INVESTIGACION y CIENCIA

¿QUE OCURRE EN EL CENTRO DE NUESTRA GALAXIA?

LOS MITOS CLASICOS

REACCION EN CADENA DE LA POLIMERASA

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



DEFORESTACION EN LOS TROPICOS

JUNIO 1990
500 PTAS.

Los espacios en gris corresponden a publicidad en la edición impresa



Junio de 1990 Número 165

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Gracia: *Deforestación en los trópicos*; Manuel Puigcerver: *¿Qué está ocurriendo en el centro de nuestra galaxia?*; Santiago Torres: *Reacción en cadena de la polimerasa*; Juan P. Adrados: *Reactores avanzados de agua ligera*; Manuel Calvo y Ramón Vegas Martínez: *Formación de cráteres de impacto sobre la Tierra*; José M. Gaztelu: *La información del cerebro al ojo*; Ignasi Queralt: *Esmaltes antiguos*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

José M. García de la Mora y Joan-Domènec Ros

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

María José Báguena, Pedro Pascual, Luis Alonso y Marià Alemany

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
10-11	Jacques Jangoux, Peter Arnold
12-13	Ian Worpole
14	Ian Worpole (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*)
15	Johnny Johnson
16	Edward Bell
19	Very Large Array
20	George V. Kelvin
22	Very Large Array
23	Observatorios Nacionales de Astronomía Optica
24	Interferómetro de Ondas Milimétricas Hat Creek, Universidad de California
25-26	George V. Kelvin
27	Johnny Johnson
31	George V. Kelvin
32-36	Michael Goodman
37	Cetus Corporation
39	Stan Washburn, Anthro Photo (*arriba*), M. Shostak, Anthro Photo (*abajo*)
40	Patricia J. Wynne
41	Irven DeVore, Anthro Photo
48-49	George Retseck
50	Johnny Johnson
51-54	George Retseck
59	Barrie Rokeach
60-62	Ian Worpole
63	Richard A. F. Grieve
64	Johnny Johnson
65	NASA
69	Lester Lefkowitz
70-72	Tom Prentiss
73	Tom Prentiss (*izquierda*), Robert B. Barlow, Jr. (*arriba y abajo derecha*)
87	Galería Freer (*arriba*), micrografías de Pamela B. Vandiver
88	Edward Bell
89	Andrew Christie
90	Galería Freer (*izquierda*), micrografías de P. B. Vandiver
91	(1) Museo J. Paul Getty; (2) Museo de Arte Metropolitano (*izquierda*), Museo Brooklyn (*centro y abajo*); (3) Museos de Arte de la Universidad de Harvard; (4) Museo de Arte de Seattle; (5,6) Galería Freer; (7) Instituto de Arte de Chicago; micrografías de P. B. Vandiver
92-93	M. Goodman y P. B. Vandiver
96-99	Michael Goodman
100-105	Documentos PLS



LA FOTOGRAFIA de la cubierta muestra una pluviselva brasileña en llamas. La quema de los bosques para aclarar el terreno que más tarde se dedica a cultivos o ganadería es la causa principal, junto con la explotación maderera abusiva, de la destrucción acelerada de los bosques tropicales. La conversión de los terrenos forestales a otros usos y la sobreexplotación se han visto impulsadas por las políticas de los gobiernos de muchos países en desarrollo que se enfrentan con serias presiones económicas (véase "Deforestación en los trópicos" por Robert Repetto, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 302 45 05 - Fax 412 52 75

OJD DIFUSION · PUBLICIDAD

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por T2, Llull, 145 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

...ciento cincuenta años

Manuel Hurtado de Mendoza publicó su *Vocabulario médico-quirúrgico*.

Tras estudiar cirugía en el Colegio de San Carlos, de Madrid, Hurtado de Mendoza militó en el bando afrancesado durante la Guerra de Independencia. Al terminar la contienda, se exilió en Francia por motivos políticos, a una edad en la que, según Francisco Méndez Alvaro, "sin poderle llamar niño, no podía llamársele hombre". En París, completó su formación científica, obteniendo el título de doctor en medicina e ingresando en la célebre Société Médicale d'Emulation. Había conocido en España a François Broussais, que luego fue en París uno de sus maestros y de cuya doctrina devino ferviente seguidor el resto de su vida.

Hasta su regreso a España en 1820, Hurtado desplegó una notable actividad científica, publicando trabajos en varias revistas científicas francesas, entre ellas los *Anales de la Société de médecine pratique de Montpellier* y el *Journal de médecine, chirurgie et pharmacie* dirigido por Jean Nicolas Corvisart. Destacan los que dedicó al tratamiento de las fiebres intermitentes (1815), al "cólico gangrenoso" (1817) y, sobre todo, al uso terapéutico de la raíz de ratania (1816), que fue traducido al alemán. Publicó también entonces una *Notice biographique* (1816) de Tomás García Suelto, médico español afrancesado que murió en el exilio.

Al comienzo del trienio liberal, Hurtado volvió a España. Durante casi una década tuvo en Madrid un gran prestigio, reuniendo una nutrida clientela y consiguiendo que el brusismo alcanzara una extraordinaria influencia. Desarrolló, además, una intensa labor de publicista, que contribuyó decisivamente a difundir en España los avances de la nueva medicina europea. Fundó la revista *Décadas médico-quirúrgicas*, de la que llegaron a aparecer veinte volúmenes (1821-1828). En colaboración con Celedonio Martínez Caballero, médico español formado en Londres, redactó un *Suplemento* en cuatro tomos (1820-1823) al diccionario médico de Antonio Ballano, que había comenzado a escribir García Suelto. Tradujo al castellano el manual anatómico de Jacques Pierre Maygrier (1820), tres textos franceses sobre la generación (1821) y dos importantes obras de su maestro Broussais: el *Tratado de fisiología aplicada a la patología* (1827) y *De la irritación y de la locura* (1828). Defendió el brusismo en una *Vindicación* (1826) y publicó asimismo varias obras originales. Sobresalen entre ellos una *Nueva monografía de la calentura amarilla* (1820) ferozmente anticontagionista y, sobre todo, un *Tratado elemental completo de anatomía* (1829-1830). Los tres volúmenes de este último incluyen, aparte de una buena exposición de la anatomía descriptiva, los primeros compendios españoles de anatomía topográfica y de anatomía patológica y una "anatomía general" que incorpora las indagaciones microscópicas precelularistas.

La situación de Hurtado cambió radicalmente con el hundimiento del brusismo y también con la incómoda posición política en la que, a partir de 1834, quedaron los antiguos afrancesados, que Fernando VII había protegido hasta finales de su reinado. "En vano quiso refugiarse en la literatura –afirma una de sus necrologías– porque sus obras empezaron a ser tan poco buscadas como su asistencia." Publicó entonces obras que no son más que refundiciones de su producción anterior, como unas *Instituciones de medicina y cirugía* (1839) y el citado *Vocabulario médico-quirúrgico* (1840), y tradujo un texto tan anticuado como el *Compendio de la nosografía* (1842) de Philippe Pinel, del que existía, además, una versión castellana anterior. Escribió asimismo una *Historia crítica de la Medicina* (1845), de acuerdo con la orientación "filosófica" procedente de Pierre J. G. Cabanis. En sus últimos años vivió amargado por una sordera casi total. Se interesó entonces especialmente por la terapéutica, aunque sin renunciar a la doctrina brusista, cuando ésta ya había sido abandonada por todos. Intentó, sin éxito, mantener una revista titulada *Indicador terapéutico*. En cambio, publicó una notable *Enciclopedia de terapéutica* (1843), reeditada poco antes de su muerte.

Ofrecemos a continuación un fragmento de su *Tratado de anatomía patológica* (1830), en el que resumió los estudios que poco antes había realizado René T. H. Laennec acerca de la cirrosis hepática:

"Las cirrosis existen en el estado de crudeza y en el de reblandecimiento. En el primero de estos estados presentan un tejido de un color aleonado más o menos oscuro que algunas veces se asemeja un poco al verdusco. No puede formarse mejor idea de ellas que comparándolas a las que

presentan las cápsulas supra-renales en el adulto. Este tejido, aunque muy consistente, tiene una especie de flacidez que no puede compararse mejor que a la de ciertos fungos, o de un cuero blando. El tejido de la cirrosis es por otra parte compacto, bastante húmedo y muy delgado, y en él no se distingue ninguna señal de fibras, aunque en ciertos casos presenta divisiones en forma de escamas.

"Las cirrosis, al reblandecerse, adquieren un color más moreno, y cuando el reblandecimiento está bien formado, la masa morbosa se halla convertida en una especie de papilla de un moreno verdoso, sin olor y un poco pegajoso.

"Laennec admite tres especies de cirrosis; 1.° cirrosis en masas; 2.° en placas; 3.° en quistes. Cuando existen cirrosis en el hígado, forman comúnmente masas cuyo volumen jamás excede al de un hueso de cereza y algunas veces iguala apenas el de un grano de mijo. Estas masas son siempre muy numerosas y todo el tejido del hígado está sembrado de ellas. Su pequeñez hace que cuando se corta un hígado en el que existe un gran número de ellas, su tejido parece a primera vista homogéneo y de un color aleonado bastante semejante al que comúnmente llaman cuero de bota. Pero si se examina con más atención el tejido hepático, se percibe fácilmente que está lleno de una gran cantidad de corpúsculos bastante semejantes por el aspecto a los lóbulos de grasa endurecida y rojiza que comúnmente se encuentran en el tejido celular subcutáneo del muslo y de la pierna de los sujetos afectados de anasarca. Estas pequeñas masas están algunas veces muy íntimamente unidas al tejido del hígado; pero con bastante frecuencia están separadas de él por una capa delgada de tejido celular que las forma una cubierta tenue, y entonces se desprende con bastante facilidad.

"Los efectos locales de este género de materia morbosa son tal vez los más singulares que presentan las investigaciones de anatomía hechas hasta el día.

"La superficie exterior del hígado se marchita y se arruga del mismo modo que una manzana que se ha secado. Otras materias morbosas desarrolladas en el hígado pueden ocasionar algunas modificaciones del órgano análogas a las precedentes; pero lo que hay aquí de particular es la disminución de volumen, tanto más extraordinaria, cuanto que se forma un cuerpo nuevo algunas veces muy abundante. Por otra parte, el tejido del hígado, en general, permanece casi en el estado natural, y algunas veces sólo es más pálido. La bilis no se altera de un modo bien sensible por la existencia de las cirrosis en el hígado, las cuales rara vez están acompañadas de la ictericia y no producen por lo común dolores locales.

"El más constante de los efectos generales de esta enfermedad es la ascitis, a la cual se une también muchas veces el edema de las extremidades inferiores. Las cirrosis producen el enflaquecimiento, pero siempre de un modo poco notable, y no hay calentura."


VOCABULARIO MEDICO-QUIRURGICO

ó

DICCIONARIO

DE MEDICINA Y CIRUGIA,

QUE COMPRENDE

LA ETIMOLOGIA Y DEFINICION DE TODOS LOS TERMINOS USADOS EN ESTAS DOS CIENCIAS POR LOS AUTORES ANTIGUOS Y MODERNOS.

POR

DON MANUEL HURTADO DE MENDOZA,

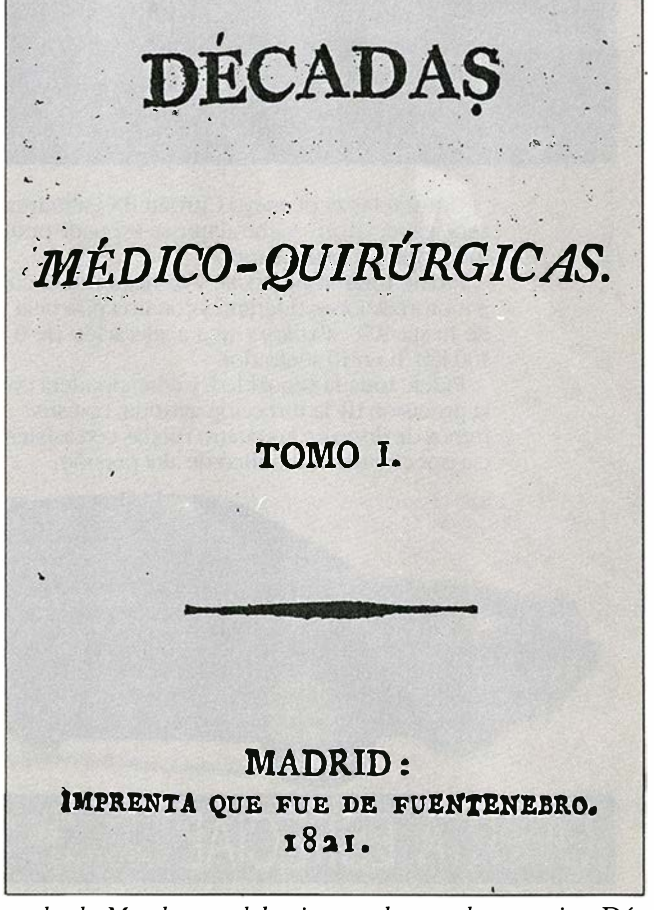
Doctor en las dos Facultades de Medicina y Cirugia-Médica, Académico de número de la Academia de Medicina y Cirugia de esta Corte, Miembro corresponsal de la Médico-práctica de Barcelona, de la general de Ciencias de Córdoba y su Reino, de la Sociedad Médico-quirúrgica de Cadiz; de la Facultad de Medicina de Paris y de la Sociedad Médica de emulacion establecida en su seno; del Real Ateneo de Medicina, del Círculo médico ó Academia de Medicina, y de la Real Sociedad de Medicina práctica de la misma capital; de las Reales Sociedades de Medicina práctica de Mompeller, Burdeos y Marsella, y de la Real Academia de Ciencias Físicas y Médicas de Orleans; de la Academia Imperial Josefina de Viena; de la Sociedad Médico-Quirúrgica de Filadelfia, etc., etc.

Madrid.

BOIX, EDITOR.

Impresor y Librero, calle de Carretas, número 8.

1840.


DÉCADAS

MÉDICO-QUIRÚRGICAS.

TOMO I.

MADRID:

IMPRENTA QUE FUE DE FUENTENEBRO.

1821.

Portadas del Vocabulario médico-quirúrgico, *de Manuel Hurtado de Mendoza y del primer volumen de su revista* Décadas médico-quirúrgicas, *publicación de gran relieve en la historia del periodismo médico en España y de la que llegaron a aparecer veinte volúmenes.*

Deforestación en los trópicos

Las políticas de los gobiernos que impulsan la explotación —en particular la tala excesiva y el aclareo para instalar comunidades agrarias y ganaderas— son responsables de la destrucción acelerada de los bosques tropicales

Robert Repetto

Los bosques tropicales están desapareciendo a una tasa de cientos de miles de kilómetros cuadrados cada año. La deforestación supone el derroche de un valioso recurso natural en todo el mundo en vías de desarrollo, está conduciendo a la extinción de un incontable número de especies de animales y plantas y puede tener efectos importantes sobre el clima del planeta.

Entre los agentes de devastación se cuentan la gestión comercial despilfarradora de la explotación y la conversión de áreas forestales para dedicarlas a la ganadería y a la agricultura. Datos recopilados por numerosos investigadores y evaluados por el autor y sus colegas en el Instituto de Recursos Mundiales indican que la explotación y la reconversión son, en buena medida, resultado de ciertas políticas gubernamentales. Muchas de estas políticas obedecen a las duras presiones económicas que sufren los países deudores subdesarrollados. Estas presiones se exacerban, a su vez, con ciertas prácticas de los países desarrollados y sus entidades financieras, nacionales o internacionales. En consecuencia, lo mismo las causas que los efectos de la degradación del bosque tropical constituyen un problema en el que se encuentra involucrado el mundo entero.

La destrucción del bosque tropical reviste bastante más gravedad de lo que se creía hace apenas una década,

ROBERT REPETTO dirige el programa de política económica y sociedades del Instituto de Recursos Mundiales con sede en Washington. Se graduó en la Escuela de Economía de Londres y se doctoró por la Universidad de Harvard. Repetto ha ejercido su profesión en India, Pakistán e Indonesia y ha sido profesor de economía y demografía en la Escuela de Salud Pública de Harvard, amén de consultor de un importante número de entidades de ayuda al desarrollo, antes de incorporarse al Instituto en 1983.

a juzgar por las recientes estimaciones basadas en la teledetección desde satélites y en cuidadosas observaciones de campo [*véase la figura 4*]. Por citar un ejemplo; los estudios llevados a cabo en la India por el Centro Nacional de Teledetección arrojan una estima de la tasa de deforestación, a comienzos de los ochenta, de 1,5 millones de hectáreas anuales, una estima que decuplica la realizada anteriormente por la FAO (Organización para la Alimentación y la Agricultura); las imágenes de satélite ponen de manifiesto cómo grandes extensiones consideradas legalmente bosques eran áreas deforestadas.

Esta tasa de deforestación supone riesgos extremos para los sistemas naturales. Se estima que la liberación de anhídrido carbónico a la atmósfera a consecuencia de la deforestación representa de un 15 a un 30 por ciento de las emisiones anuales globales de dióxido de carbono y, por tanto, contribuye de modo sustancial a la formación del efecto invernadero. Y todavía más, la pérdida de bosques tropicales está destruyendo el hábitat de un gran número de especies vegetales y animales. Cerca de la mitad de las especies del mundo viven en los bosques tropicales; en 10 regiones biológicamente ricas y seriamente amenazadas, que suponen el 3,5 por ciento del bosque tropical aún existente, el 7 por ciento de todas las especies de plantas se extinguirán probablemente antes de fin de siglo, si continúa la actual tendencia.

Comienza a aparecer una sensación de crisis en los trópicos. Los gobiernos han empezado a advertir que la rápida deforestación representa un derroche de valiosos recursos y una importante pérdida económica. En algunos casos, se han tomado las primeras medidas. Tailandia prohibió recientemente la explotación forestal comercial, a pesar de las protestas de influyentes concesionarios, cuando los controles demostraron que la cubierta forestal había caído del 29 al 19 por ciento de la superficie del territorio entre 1985 y 1988, y después de que los deslizamientos de las laderas de colinas deforestadas privaran de sus hogares a 40.000 personas. En las Filipinas, donde existen bosques vírgenes que abrigan una valiosa familia de árboles de gran altura, las dipterocarpáceas, la zona forestal ha disminuido de 16 millones de hectáreas, en 1960, a menos de un millón de hectáreas, confinadas en remotas regiones montañosas; se ha suprimido la explotación en muchas provincias. En consecuencia, las serrerías filipinas están cerrando o importan madera de



Sabah y Sarawak, dos estados de Malasia.

Las serrerías de los que fueron importantes centros de producción indonesios de Sumatra y Kalimantan están experimentando déficits de madera de alta calidad y están importando madera de Sabah, Sarawak y la provincia indonesia de Irian Jaya. Los responsables del gobierno han comenzado a darse cuenta de que los ambiciosos planes indonesios para desarrollar su industria maderera pueden verse truncados por falta de madera. Incluso Sabak y Sarawak, que han sido tradicionalmente las principales fuentes de madera en Asia, están extrayendo casi el doble de la producción de su bosque, con lo que ésta decrece rápidamente.

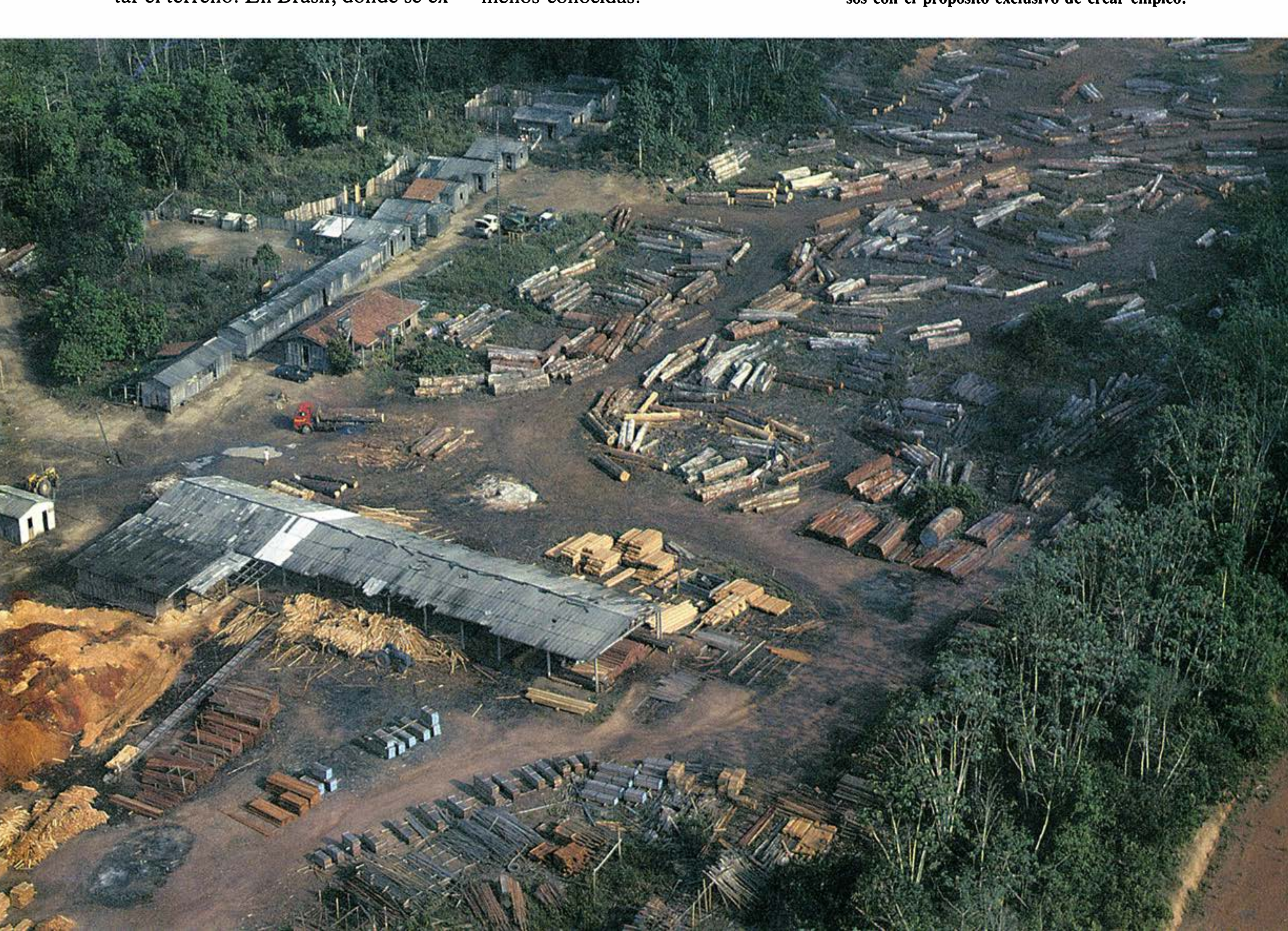
En Costa de Marfil, donde la superficie forestal ha disminuido un 75 por ciento desde 1960, se han quemado unos 200 millones de metros cúbicos de madera comercial para preparar el terreno para la agricultura, lo que ha supuesto una pérdida de tal vez unos cinco mil millones de dólares. En Ghana, donde ha desaparecido el 80 por ciento de sus bosques, el Departamento de Bosques estima que sólo se ha aprovechado el 15 por ciento de la madera antes de deforestar el terreno. En Brasil, donde se extrae poca madera antes de aclarar el bosque quemándolo, las pérdidas en madera comercial que resultan de esta práctica se aproximan a los 2500 millones de dólares al año.

La costumbre de quemar el bosque para aclarar el terreno supone un derroche obvio. Los propios madereros destruyen enormes cantidades de madera con el uso poco cuidadoso de maquinaria y con técnicas de explotación derrochadoras. Si extraen el 10 por ciento de la madera de un área, seleccionando árboles maduros de las especies más valiosas, normalmente destruyen la mitad de la madera restante, incluyendo tanto árboles inmaduros de las especies valiosas como otros árboles maduros de especies menos cotizadas que podrían resultar aprovechables. A menudo, los madereros vuelven a las áreas ya explotadas, para extraer más madera, antes de que la zona se haya recuperado, infligiendo cada vez graves daños a los árboles que quedan, lo que imposibilita la regeneración. En Ghana y Costa de Marfil, algunas áreas han sufrido la reexplotación hasta tres veces en 10 o 15 años, a medida que los concesionarios obtenían contratos de venta de la madera de las especies menos conocidas.

De acuerdo con un reciente estudio encargado por la Organización Internacional de la Madera Tropical, ni tan sólo el 0,1 por ciento de lo que queda del bosque tropical se gestiona de modo eficaz para lograr una productividad mantenida. Aún más; en la mayoría de países, una vez explotados los bosques designados a tal fin, se les deja sin protección ante ganaderos y agricultores, expuestos a la quema o al aclareo. La experiencia del Amazonas denuncia que la deforestación adquiere particular celeridad cuando se abren carreteras, ya sea para extraer la madera o con cualquier otro fin.

La degradación biológica del bosque tropical comporta una continua escalada de precios. La madera ha alcanzado una cotización muy alta porque la de origen tropical ha roto su tendencia a la baja y muchas especies que antes no se comercializaban encuentran ahora un lugar en el mercado. Los países que autorizaron a los madereros una extracción limitada a

1. ASERRADERO en el estado brasileño de Pará, donde, al igual que en muchos otros países en vías de desarrollo, la corta excesiva constituye una de las causas principales de deforestación. Los gobiernos subvencionan aserraderos ruinosos con el propósito exclusivo de crear empleo.



dos o tres árboles por hectárea, destruyendo el resto como no comercial, lamentan su cortedad de miras. Parece que la tendencia al alza de los precios de la madera tropical se mantendrá ante la pérdida creciente de las reservas de Asia, Centroamérica y Africa Occidental en la próxima década; la madera de la cuenca del Amazonas, ahora pasto del fuego, será cada vez más valiosa.

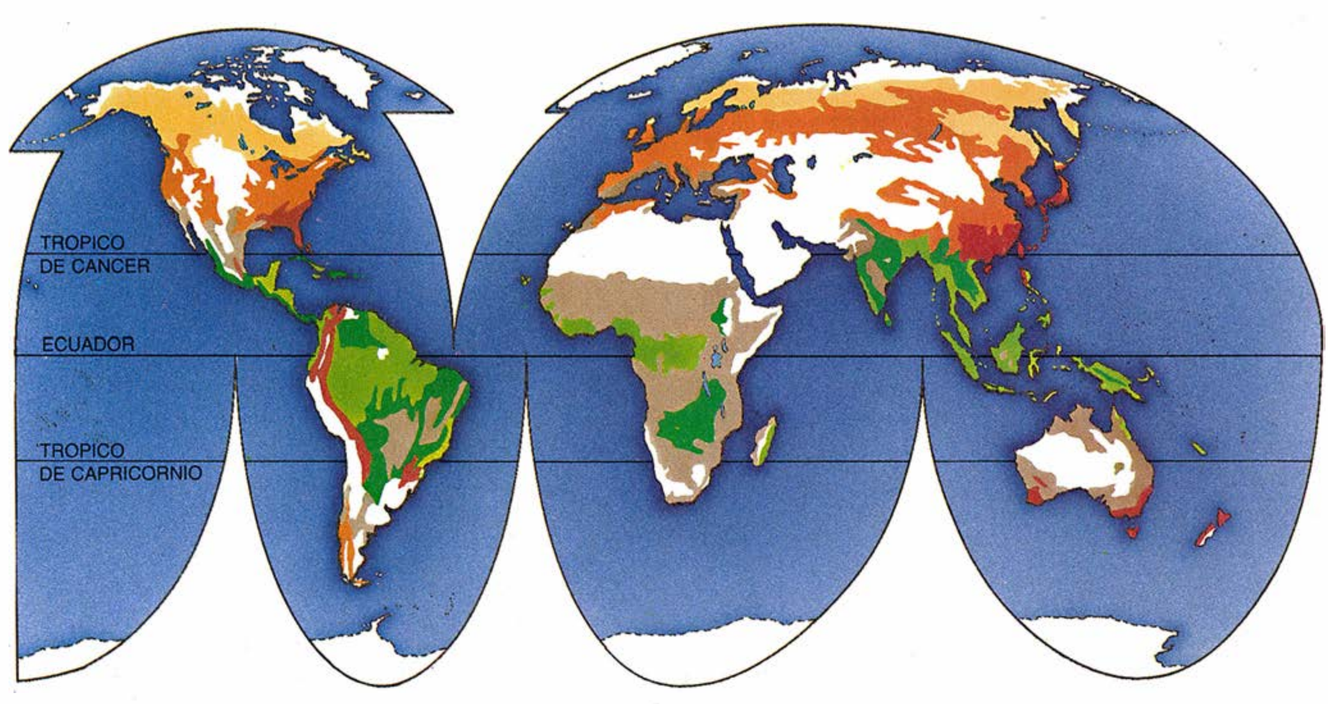
Los ingresos potenciales recababables de la venta de esa madera quemada no son las únicas mermas económicas que sufren los países deforestados. Un 70 por ciento de la madera cortada en los países tropicales se utiliza localmente, sobre todo para combustible. La pérdida de bosque acentúa la escasez de combustibles. Los residentes se ven privados también de otros recursos forestales importantes: animales de los que se obtiene carne, frutos, aceites, nueces, edulcorantes, resinas, taninos, fibras, materiales de construcción y una amplia gama de sustancias utilizadas en medicina. El valor de los productos forestales no madereros exportados por Indonesia en 1986 ascendió a 123 millones de dólares.

Los estudios recientes han demostrado que el valor de los ingresos derivados de productos forestales distintos de la madera —recursos fácilmente renovables que pueden explotarse de manera permanente— puede ser muy superior al valor de aquélla. Además, estos ingresos benefician a la población local, en tanto que los ingresos derivados de las operaciones madereras suelen acabar en los bolsillos de élites metropolitanas o empresas extranjeras. Las operaciones de tala han despertado violentas protestas entre los habitantes de Sarawak, Filipinas y otros países.

Además de la pérdida de madera, la deforestación tiene a menudo importantes repercusiones sobre el suelo, la calidad del agua e incluso sobre el clima local. Los suelos lixiviados se ven alterados por la maquinaria pesada y, expuestos a las fuertes lluvias tropicales, se erosionan rápidamente o pierden los escasos nutrientes que les quedan. Estudios llevados a cabo en Ghana demuestran que la eliminación de los suelos de bosques de sabana incrementa las tasas de erosión desde menos de una tonelada a más de 100 toneladas por hectárea y año, con la consiguiente pérdida de nutrientes, que es un 40 por ciento superior a los aportes por fertilizantes químicos. La pesca fluvial se ha resentido profundamente con la sedimentación, cada vez mayor, que se deriva de la erosión o de la deforestación en las llanuras aluviales, que proporcionan hábitats estacionales que resultan críticos para muchos peces. La deforestación a gran escala interrumpe el ciclo del agua, reduciendo la precipitación, lo que incrementa la temperatura del suelo y, tal vez, origina cambios ecológicos de largo alcance. A menudo, la extracción de madera constituye el primer paso hacia la deforestación. Suele seguirle la tala rasa de árboles y un cambio deliberado de los usos del suelo, orientándolo con frecuencia hacia la ganadería o hacia tipos de agricultura inadecuados, que no sólo resultan ambientalmente inapropiados sino que se traducen también en importantes pérdidas económicas. En ese sentido, la investigación realizada en el estado brasileño de Acre, en rápida deforestación, muestra que, por culpa de la menor productividad de los pastos, y la consiguiente pérdida de capacidad de carga ganadera, los ingresos por hectárea que actualmente se obtienen de la recolección del caucho y de las nueces cuadruplican los ingresos aportados por la cría de ganado.

Cada vez más, la experiencia y el análisis refuerzan el argumento según el cual la deforestación no ha abierto ninguna vía hacia el desarrollo económico; antes bien, en muchos países tropicales ha supuesto una merma continuada de recursos de valor creciente. Por otro lado, la deforestación no es inevitable. Se trata, en buena medida, de la consecuencia de una administración y una política inapropiadas y de la falta de atención a los importantes problemas sociales y económicos cuyo verdadero origen se sitúa fuera del sector forestal.

En primer lugar, los gobiernos de muchos países en vías de desarrollo —propietarios de, por lo menos, un 80 por ciento de los bosques tropicales densos y maduros— no han sopesado bien este recurso. En cuanto propietarios, pueden hacerse con el valor total de la madera del bosque, excepto por lo que se refiere al costo de la mano de obra y el capital que se ha de invertir en las tareas de gestión y extracción, cargando tasas elevadas o vendiendo los derechos de tala a los mejores postores. En cambio, con



muy pocas excepciones, han permitido que muchos de estos recursos hayan ido a parar a manos de los especuladores y concesionarios ligados, muchas veces, a empresas extranjeras.

En las Filipinas, por ejemplo, si el gobierno hubiera sabido aprovechar las ganancias producidas por los tres millones de metros cúbicos de madera cortada en 1987, sus ingresos por este concepto hubieran excedido los 250 millones de dólares, seis veces más de lo recaudado. Las bajas tasas, la tala camuflada y la evasión de impuestos dejan buena parte de las ganancias en manos de los empresarios madereros, los propietarios de las serrerías y los comerciantes. El Banco Asiático de Desarrollo ha estimado que las ganancias totales se elevan, en promedio, a unos 4500 dólares por hectárea cortada.

Los gobiernos han propiciado esta situación manteniendo bajos los impuestos y las tasas, liberalizando la exportación de la madera procesada, para estimular la industria nacional, y garantizando exenciones a las compañías explotadoras. Muchos gobiernos ni siquiera han hecho cumplir las modestas cargas oficiales. (Entre 1979 y 1984, se cortaron en Indonesia 125 millones de hectáreas, pero sólo se cobraron las tasas e impuestos correspondientes a 86 millones de hectáreas.) En consecuencia, pocos países tropicales han logrado que los explotadores se obligaran a unas tasas normales de usufructo e ingresaran el valor de los recursos forestales en el tesoro público [*véase la figura 5*].

La atmósfera favorable generada por esta situación ha fomentado la repentina prosperidad de la industria maderera en los trópicos, induciendo a los empresarios nacionales y extranjeros −muchos con escasa experiencia forestal− a la búsqueda de fortunas rápidas. Bajo la presión de estos empresarios, las concesiones de los gobiernos para la explotación han superado con mucho las áreas que pueden supervisar efectivamente y que, en ocasiones, se extienden más allá de los límites de las zonas forestales designadas para producción y alcanzan bosques protegidos y parques nacionales. Las concesiones en Costa de Marfil ascendieron hasta dos tercios de la producción total del país en siete años. De 755 concesionarios políticamente favorecidos, sólo 51 cortan ellos mismos. Muchos se limitan a vender sus derechos, sacando provecho de su papel de intermediarios. En Indonesia, Tailandia y Filipinas, las áreas bajo concesión superan la extensión total de producción forestal.

La oportunidad de obtener beneficios ha atraído a políticos y hombres de negocios. En Tailandia, Sarawak, Sabah, Filipinas y otros lugares, ministros, senadores y demás políticos poderosos están implicados en la industria de la madera. En Filipinas, por ejemplo, el senador Juan Ponce Enrile, principal líder de la oposición, controla importantes concesiones de madera que adquirió bajo el régimen de Marcos. En Indonesia, la mayoría de las 544 personas que disponen de las concesiones son militares retirados u oficiales del gobierno que pueden ejercer presiones en Yakarta para frenar las investigaciones acerca de las violaciones de las leyes forestales. El control real por parte del personal del departamento forestal, a menudo de rango inferior, se hace punto menos que imposible.

Mientras derrochan sumas enormes de bienes forestales, los gobiernos de los países tropicales no son capaces de invertir lo suficiente en la administración y gestión forestal. En Indonesia, cerca de la mitad de todos los técnicos forestales con experiencia trabajan en Yakarta, alejados de los bosques por cientos de kilómetros de mar; los que van al campo se encuentran con que, para su alojamiento y transporte, dependen de los concesionarios. Un estudio llevado a cabo en Ghana puso de manifiesto que el 66 por ciento de todos los puestos gubernamentales para funcionarios forestales, el 54 por ciento de las plazas para profesionales jóvenes y el 43 por ciento de las plazas de técnico forestal se encontraban vacantes. Gabón tiene suficiente personal forestal, pero carecen de medios para realizar su trabajo en el campo: el presupuesto del Departamento se redujo en un 75 por ciento entre 1984 y 1988. Significa todo ello que, si bien muchos países han elaborado normas y se han dado concesiones mirando el mantenimiento de la productividad sobre, al menos, varios ciclos de tala, casi ninguno de estos bosques se gestiona de manera que tal objetivo se consiga.

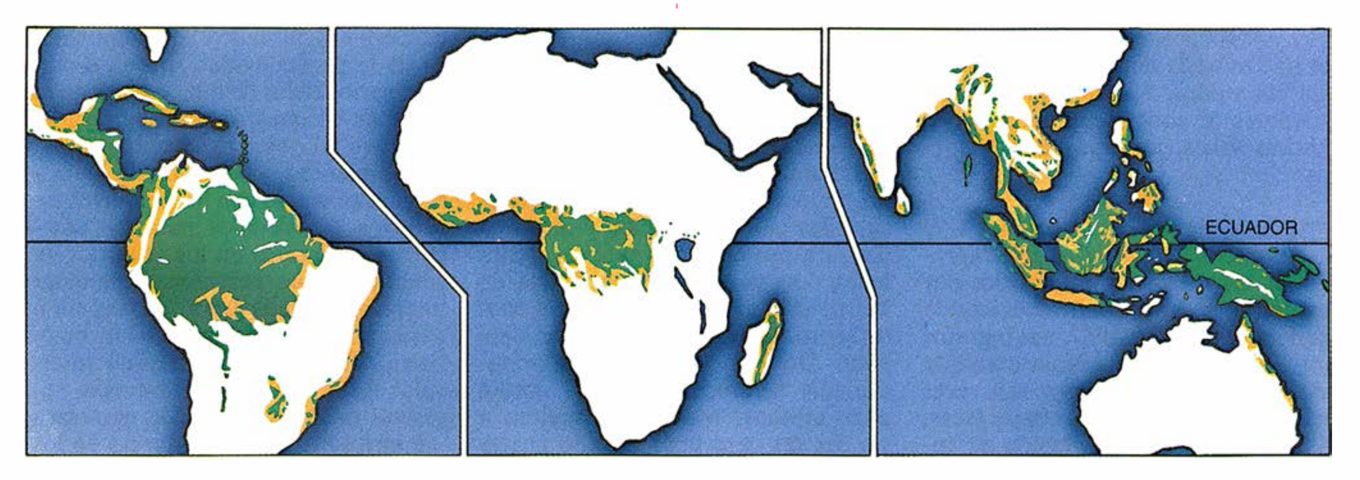
Tan ineficaz supervisión de los gobiernos se amasa con los perversos incentivos establecidos para las compañías madereras en los acuerdos de concesión, que desaniman cualquier interés que pueda existir en la gestión para conseguir una producción razonable. Aunque se prescriben intervalos de 25 a 35 años entre talas sucesivas en los sistemas de entresaca −e incluso intervalos mayores en los sistemas monocíclicos (en los que toda la madera comercializable se extrae al mismo tiempo)−, muchos acuerdos se establecen por períodos de 20 años o incluso más cortos. Algunos de sólo 5 años. En estas condiciones, los concesionarios han abandonado todo escrúpulo de si se mantiene o no la productividad para posteriores talas.

A menudo se gravan impuestos sin apenas criterio, basados en el volumen de madera extraída. Con esto se impulsa la práctica de la "alta calidad", a tenor de la cual los madereros extraen sólo los troncos de mejor calidad y de más valor, y lo hacen sobre grandes áreas y con el mínimo costo. Dado que los árboles cuyo valor es inferior al de los impuestos se pueden destruir impunemente, suelen ocasionarse importantes daños a la parte del bosque que no se aprovecha. En Sabah, Indonesia y Filipinas, se destruyen o se dañan durante las operaciones de tala del 45 al 75 por ciento de los árboles que no se extraen. Impuestos basados, no en lo que se extrae, sino en el tamaño de la concesión y en la madera comercializable afectada, potenciarían un aprovechamiento más completo de la madera presente en áreas de tala más reducidas; los impuestos *ad valorem* (basados en el valor de los troncos extraídos) forzarían, asimismo, una utilización plena.

Incentivos mal orientados merman también el rendimiento de las industrias de transformación. Muchos países tratan de incrementar el empleo y el valor añadido de sus productos forestales impulsando la manufactura en vez de la exportación de la madera. Deben ofrecer fuertes incentivos a las empresas locales para superar las elevadas tasas de protección contra la importación de madera procesada de los gobiernos europeos y japonés. Medidas extremas tales como los límites a la exportación o cuotas de exportación basadas en el volumen de madera procesada en el país han creado empresas nacionales ruinosas que,

BOSQUE BOREAL DE CONIFERAS
BOSQUE MIXTO TEMPLADO
BOSQUE HUMEDO TEMPLADO
BOSQUE TROPICAL HUMEDO PEREMNIFOLIO
BOSQUE TROPICAL HUMEDO CADUCIFOLIO
BOSQUE ESCLEROFILO

2. AGRUPACION DE LOS BOSQUES del mundo en seis zonas principales de vegetación. Los bosques tropicales que se abordan en este artículo son los húmedos perennifolios, húmedos y caducifolios, e incluye algunos esclerófilos.



3. LOS BOSQUES TROPICALES cubrieron un día toda el área coloreada. En la actualidad, la pluvisilva ha desaparecido de las áreas coloreadas en amarillo; la extensión ocupada actualmente se muestra en color verde. El mapa está basado en otro publicado por el Instituto Smithsoniano.

muchas veces, se mantienen sólo para conservar los derechos de exportación.

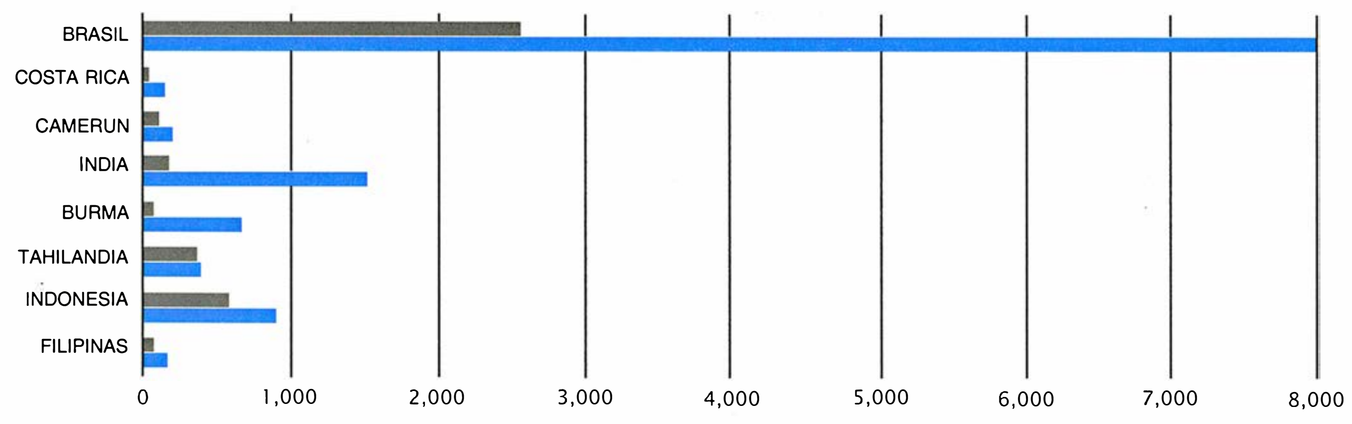
En Costa de Marfil, tales cuotas han generado una industria de procesamiento desmedida que derrocha un 30 por ciento más de la madera que consumen las industrias rentables para producir los mismos resultados. Ese despilfarro —con diferencias de hasta 15 dólares por metro cúbico en el mercado libre— se mantiene para no perder la venta de los derechos de exportación de la madera más valiosa. En Zaire, los concesionarios deben procesar en el país el 70 por ciento de la madera talada. Esta exigencia ha incrementado la corta, porque la exportación de las especies nobles paga las ruinosas serrerías, cuyos productos nacionales se venden a precios de hasta un 30 por ciento por debajo de los costes de producción.

Tales medidas de protección a ultranza pueden crear poderosas industrias locales capaces de resistir la regulación. Indonesia ha logrado atraer entre el 70 y el 80 por ciento del mercado mundial de contrachapados limitando la exportación de madera en rollo y proporcionando generosos incentivos. La rápida y derrochadora expansión de la industria de procesado de madera consume ahora 35 millones de metros cúbicos anualmente, más que los máximos exportados con anterioridad; con los actuales planes, se espera duplicar la capacidad durante la década de los noventa.

Los países que protegen a las empresas de transformación ruinosas arrastran fuertes pérdidas económicas y fiscales. En las Filipinas, cada tronco exportado como contrachapado supone una pérdida de 100 a 110 dólares por metro cúbico con respecto al valor que alcanzaría si se exportara sin procesar o simplemente aserrado. El gobierno deja de ingresar cada año más de 20 millones de dólares por tasas de exportación para favorecer la salida al exterior de esta madera contrachapada.

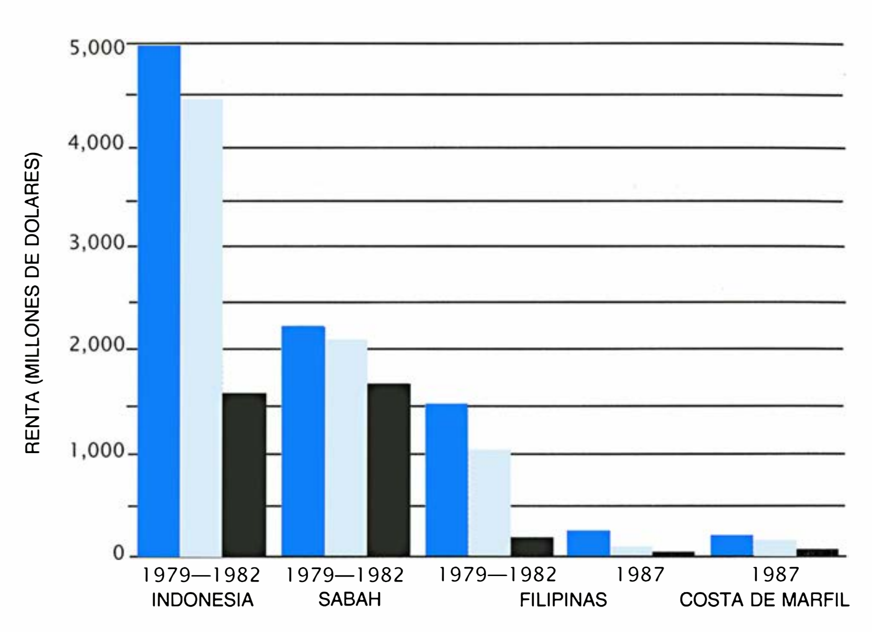
Los países industrializados han contribuido a esos problemas de la política forestal en los trópicos, y han sacado partido de esas dificultades. Las compañías europeas y americanas han acumulado intereses en las industrias de tala y procesado, sobre todo en los países tropicales de Africa e Iberoamérica, pero los empresarios japoneses están desplazando ahora a sus rivales en el negocio maderero. Japón es el principal importador, llegando a alcanzar hasta el 29 por ciento de la madera tropical comercializada en 1986, lo que representa un volumen de negocio aproximadamente igual al de la Comunidad Económica Europea. Las importaciones (que a diferencia de las de la CEE están constituidas principalmente por madera en rollo) fueron un 30 por ciento superiores en 1987, debido sobre todo al auge de la construcción en Japón, donde se utiliza buena parte de la madera importada como contrachapados para la construcción, en particular para moldear cemento.

Las grandes compañías japonesas intervienen en todas las etapas de la explotación como socios y financieros de las compañías concesionarias, como exportadores e importadores,



4. TASAS DE DEFORESTACION y su crecimiento. En esta figura se comparan las estimaciones realizadas por la Organización para la Alimentación y la Agricultura al comienzo de los ochenta (*gris*) con otras recientes (*color*), basadas en imágenes de satélite y observaciones de campo.

como procesadores y como distribuidores. A medida que su papel proveedor de madera en rollo fue perdiendo importancia, las firmas japonesas han desviado su atención de las Filipinas a Indonesia, más tarde a Sabah y Sarawak; ahora han sentado sus reales en los bosques amazónicos. François Nectoux y Yoichi Kuroda opinan que los japoneses han demostrado poco interés en la continuidad de la gestión de sus grupos de empresas; han orientado sus influyentes operaciones para producir tanto y tan rápido como ha sido posible, con el fin de compensar las cargas financieras. Además, las firmas japonesas han participado en sobornos, contrabando y evasión de impuestos que abaratan la importación de madera tropical, a la vez que privan a los países exportadores de buena parte del valor de sus recursos.



5. LOS PAISES TROPICALES no han sido capaces de cobrar (en forma de impuestos, tasas de exportación y otros gravámenes) el valor total de la madera extraída de sus bosques. Las barras en azul oscuro muestran, para períodos de uno o de cuatro años, la "renta potencial" que se habría ingresado si se hubieran reglamentado las cortas en el sentido de aprovechar la cosecha máxima posible (exportada en rollo, como tablones o procesada). Las barras de color claro señalan la "renta real" que se podría haber obtenido con las cortas tal como se practican en realidad. La cantidad contante y sonante ingresada por las arcas gubernamentales se ha representado en color negro.

La gestión y la política forestal inadecuadas se ven a menudo instigadas por una política agraria errónea. Muchos países promueven la conversión del bosque tropical hacia otros usos. Las leyes de la posesión de la tierra en muchos estados, como en Sabah, permiten a los particulares obtener títulos de propiedad sobre el terreno forestal, si manifiestan una "mejora" —cortando los árboles, por ejemplo. En Filipinas, Brasil y en todas partes, el reconocimiento de los derechos de posesión y ocupación se otorgan en razón del terreno aclarado. Tales hábitos se convierten, a menudo, en un mecanismo para privatizar el bosque. Quienes reciben los derechos de propiedad los venden pronto a grandes capitalistas, quienes consolidan el dominio para establecer ranchos privados y especular.

En muchos casos, tales actividades resultarían poco rentables sin fuertes subsidios gubernamentales. En el Amazonas brasileño, los proyectos de construcción de carreteras financiados por el gobierno federal y por los bancos de desarrollo internacional han favorecido la especulación. Más de 600 ranchos de ganado, de unas 20000 hectáreas cada uno, en promedio, se han mantenido con subvenciones a largo plazo, créditos que cubren la mayor parte de los costes de inversión y exenciones. Los ranchos demostraron su falta de rentabilidad, perdiendo más de la mitad del capital invertido en menos de 15 años.

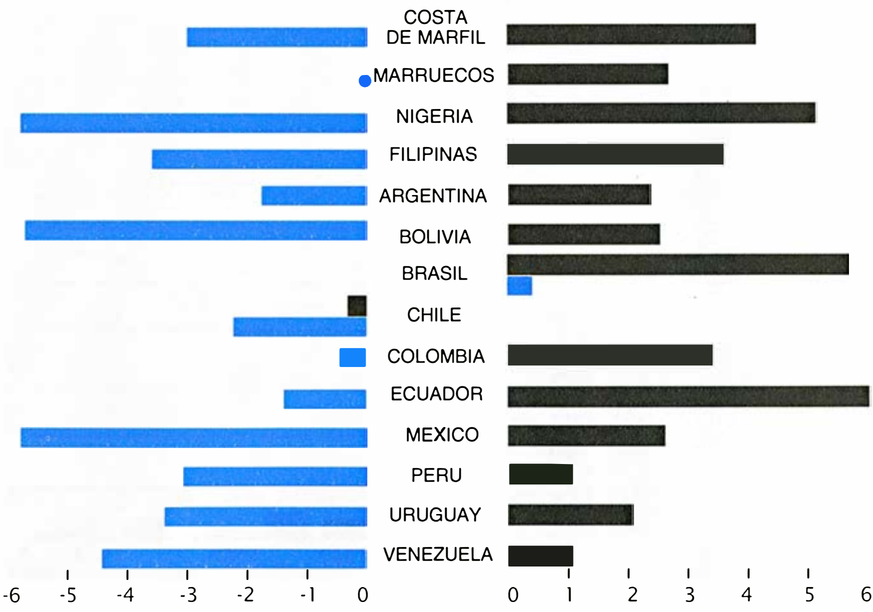
Además, los controles pusieron de manifiesto que la producción de carne alcanzó sólo el 9 por ciento de lo que se había previsto y que muchos ranchos se reorganizaron y se revendieron repetidamente, sirviendo sólo como medio de eludir impuestos. (En este sentido sí fueron rentables, pues generaron ingresos de hasta un 250 por ciento de las inversiones realizadas por sus propietarios.) Aunque el gobierno brasileño ha suspendido los incentivos para nuevos ranchos en los bosques amazónicos, continúan manteniéndose las ayudas para los ya existentes, que ocupan 12 millones de hectáreas y que han costado al tesoro público más de 2500 millones de dólares.

Los grandes diseños de la política agraria contribuyen, de forma indirecta, a la deforestación. En Iberoamérica y Filipinas, la reunión de los mejores campos en grandes propiedades, generalmente infrautilizadas, confina la creciente población rural hacia las fronteras del bosque y hacia las cuencas situadas a mayor altitud. La extrema concentración de la propiedad de la tierra se mantiene merced a unos impuestos agrarios muy bajos, que convierten las explotaciones campesinas y ranchos en inversiones atractivas para las capas de mayor nivel de ingresos, a las que no les cuesta casi nada mantener fincas extensas que generan ingresos relativamente bajos.

Los programas subvencionados de crédito rural fomentan la concentración parcelaria: la fijación de los tipos de interés provoca que los bancos restrinjan el crédito, en favor de los grandes propietarios que poseen importantes títulos que los avalan. Sobre todo en situaciones inflacionarias, en las que la posesión de la tierra proporciona seguridad, los latifundistas que tienen acceso a créditos virtualmente exentos de cargas acaban absorbiendo a los pequeños propietarios, incapaces de soportar la financiación de las inversiones necesarias para hacer productiva la agricultura. Muchos de los que han emigrado recientemente a Rondonia y Acre, en la Amazonía brasileña, son campesinos que se han visto desplazados de Paraná por la mecanización de los monocultivos.

En muchos países, la deforestación ha supuesto una válvula de escape temporal, un respiro frente a las presiones del desarrollo, a las que sólo se puede hacer frente con un planteamiento desde los fundamentos. En Filipinas, las tasas de crecimiento demográfico en las tierras altas forestadas son incluso mayores que la media nacional del 2,5 por ciento anual, muy alta, lo que se traduce en elevadas tasas de deforestación y erosión del suelo. El gobierno se ha mostrado reacio a dirigir el control de la población, pero tampoco ataca las enormes desigualdades en la propiedad de la tierra.

El ambicioso programa de "transmigración" del gobierno indonesio, que ha conseguido trasladar cerca de un millón de familias de la congestionada Java a las islas exteriores —el ochenta por ciento se ha asentado en zonas aclaradas de bosques originarios o secundarios— constituyó un in-



6. POLITICAS DE LOS GOBIERNOS que promueven la deforestación, motivadas, a menudo, por presiones económicas. Una de tales presiones se ilustra en esta figura. Desde 1965 hasta 1980 (*barras negras*), el crecimiento económico (medido a través del producto nacional bruto) fue, en general, superior al crecimiento de la fuerza de trabajo; desde 1980 hasta 1986 (*barras de color*), la fuerza laboral creció más deprisa que muchas economías, generando desempleo y reduciendo los ingresos.

tento de proporcionar empleo y medios de vida. Con un coste de 10.000 dólares por colonia (en un país que invierte sólo 125 dólares anuales per cápita) la transmigración no compensa la lenta tasa de crecimiento del empleo en Java y ha sufrido importantes recortes en los ultimos presupuestos, como consecuencia de los bajos precios del petróleo.

Además, la rápida deforestación de los trópicos durante los años ochenta se ha relacionado, en general, con las condiciones económicas excepcionalmente difíciles con las que se enfrentan muchos países tropicales. La exportación de derivados de madera de Indonesia supone un esfuerzo consciente, orientado a superar los bajos ingresos obtenidos del petróleo y a proteger sus programa de desarrollo frente a otras posibles limitaciones. Muchos de los países más atenazados por la deuda externa son los mismos que poseen todavía mayor extensión de bosque tropical. La década de los ochenta constituye el primer período en 40 años en el que el crecimiento económico en estos países no supera el incremento de la fuerza de trabajo [*véase la figura 6*]. El empleo en el sector urbano organizado se estancó y decreció; los salarios reales se desplomaron en el mercado de trabajo urbano. Además de la migración normal del campo a la ciudad, tuvo lugar un incremento en la agricultura.

En Brasil, por ejemplo, la fuerza de trabajo agrícola creció un 4 por ciento anual entre 1981 y 1984, mientras que tuvo una tasa de crecimiento de sólo un 0,6 por ciento entre 1971 y 1976; los salarios en la agricultura descendieron casi un 40 por ciento en términos reales entre 1981 y 1985. Sin opciones alternativas, dada la concentración del suelo en grandes fundos y la falta de puestos de trabajo, los propietarios rurales emigraron a la frontera en número creciente. Con un clima económico más favorable se relajarían las presiones del desempleo, la pobreza y el crecimiento de la población sobre lo que queda del bosque tropical.

¿Hay esperanza de esa mejora? Sí aparecen, al menos, signos de un nuevo enfoque de la política forestal que refleja una mayor conciencia del significado nacional y global de los bosques tropicales.

Muchos países están poniendo los medios para captar las rentas originadas por los recursos. El gobierno de Filipinas ha impuesto limitaciones a las talas, controlado las ilegales y elevado los impuestos sobre la madera. Proyecta gravar más los impuestos sobre la madera y está considerando la posibilidad de asignar los derechos de tala de acuerdo con criterios competitivos. Costa de Marfil se apresta a aumentar la competitividad. Indonesia ha elevado sustancialmente los impuestos sobre la madera. Ghana, con la ayuda del Banco Mundial, ha incrementado los impuestos sobre la madera a un promedio del 12 por ciento del valor de exportación y prepara un nuevo incremento posterior del 50 por ciento para 1992.

Varios gobiernos están reforzando su capacidad de gestión del bosque con la asistencia de agencias de ayuda al desarrollo. El Banco Mundial y el Banco Asiático de Desarrollo ofrecen préstamos para mejorar la gestión forestal en una docena de países. Muchos de estos préstamos consolidan la reforma de la política forestal, así como las mejoras institucionales. Bajo los auspicios del Plan de Acción del Bosque Tropical, patrocinado por el Instituto de Recursos Mundiales, el Banco Mundial, el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas y la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), una cincuentena de países preparan planes de acción nacionales para gestionar y conservar sus bosques.

El interés internacional sobre los bosques tropicales ha prendido, acompañado por una voluntad de contribuir a su mantenimiento. Varias organizaciones filantrópicas de países desarrollados han destinado dinero para compensar la deuda con la naturaleza: se compra una pequeña parte de la deuda externa de un país tropical y se canjea por moneda local (gestionada normalmente por una agencia local de voluntarios) que financiará programas de conservación forestal. Algunos grupos empresariales han demostrado también un interés activo. Asociaciones de comerciantes de madera tropical de los Países Bajos y el Reino Unido han propuesto que todos los países importadores abonen una sobrecarga sobre las importaciones de madera tropical para crear un fondo que se dedicaría a la conservación del bosque.

Aún queda una gran tarea que podría realizar el mundo no tropical. El consumo inapropiado de maderas tropicales (para hacer moldes en las construcciones con cemento, por ejemplo) contribuye a la deforestación. Algunos negocios de los países industrializados están contribuyendo a la deforestación. Recientemente se supo que el banco Barclays era el mayor propietario, a través de sus subsidiarios brasileños, de dos grandes ranchos que han quemado doscientas mil hectáreas de bosque para crear pastos. (El *Sunday Times* de Londres dio la noticia de que el director del banco, al conocer estos hechos, declaró: "Siendo, como soy, un jardinero entusiasta y un botánico... me siento enormemente contrariado.")

Las instituciones de ayuda al desarrollo siguen financiando actividades que destruyen el bosque tropical. El

Banco Africano de Desarrollo ha dado su aprobación a un proyecto que pretende construir una carretera a través de una de las escasas áreas de bosque tropical y manglar que aún se conservan en Costa de Marfil. Otro de sus proyectos se propone desarrollar aserraderos con una capacidad que afectará a más de 800.000 hectáreas de bosque virgen en el Congo, aunque el país no posee capacidad de gestión del bosque y el bosque en cuestión constituye el hogar de las comunidades de pigmeos. Hay que sustituir esos proyectos por otros orientados a mejorar la gestión del bosque y favorecer la reforestación.

La capacidad internacional para frenar la destrucción del bosque tropical es grande; el Plan de Acción del Bosque Tropical proporciona para ello un marco útil. El Protocolo de Montreal sobre la protección de la capa de ozono y un convenio propuesto para mitigar el cambio climático global pueden suponer poderosos mecanismos para favorecer la cooperación. Impuestos sobre halocarburos e impuestos sobre los combustibles fósiles y otros gases que fomentan el efecto invernadero en los países industrializados ayudarán a reducir las emisiones y suministrarán los fondos necesarios para poner en marcha los programas nacionales formulados en el marco del Plan de Acción del Bosque Tropical. Deben primarse aquellos programas en los que la reducción de la deuda vaya unida a la mejora de la gestión de los recursos y a la conservación.

Nuevas formas de cooperación internacional reflejarán la creciente conciencia del mundo sobre la pérdida de los bosques tropicales, que no sólo son tesoros nacionales, sino también elementos esenciales de la biosfera de la que dependemos todos y en todas partes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PRIMARY SOURCE: TROPICAL FORESTS AND OUR FUTURE. Norman Myers. W. W. Norton & Co., Inc., 1984.

THE FOREST FOR THE TREES? GOVERNMENT POLICIES AND THE MISUSE OF FOREST RESOURCES. Robert Repetto. World Resources Institute, 1988.

PUBLIC POLICIES AND THE MISUSE OF FOREST RESOURCES. Robert Repetto y Malcolm Gillis. World Resources Institute, 1988.

TIMBER FROM THE SOUTH SEAS: AN ANALYSIS OF JAPAN'S TROPICAL ENVIRONMENTAL IMPACT. François Nectoux y Yoichi Kuroda. Gland, Switzerland, World Wildlife Fund International, 1989.

¿Qué está ocurriendo en el centro de nuestra galaxia?

Esa misteriosa región contiene antimateria, nubes radiactivas, fuentes de radiación, gas y polvo en rotación turbulenta y un invisible objeto con una potente atracción gravitatoria: un agujero negro, quizá

Charles H. Townes y Reinhard Genzel

En las noches claras y sin luna, la difusa luz de la Vía Láctea brilla con particular intensidad hacia la constelación de Sagitario. Desde hace años, los astrónomos sabían, apoyados en la distribución de grupos de estrellas y en mediciones de los movimientos estelares, que los objetos de nuestra galaxia debían describir órbitas alrededor de un centro situado en esa dirección. Descubrieron también que, en la mayoría de los casos, las demás galaxias muestran especial brillo hacia el centro porque allí aumenta la densidad de estrellas. En muchas ocasiones, las regiones centrales parecen escenario de comportamientos misteriosos: generación de enormes cantidades de energía, radiaciones peculiares y otros efectos insólitos. Lo que es más, diríase que en el mismo corazón de esas galaxias residen agujeros negros, objetos de masa ingente y densidad inimaginable. ¿Podría nuestra propia galaxia albergar también uno de esos exóticos objetos en su centro?

CHARLES H. TOWNES y REINHARD GENZEL colaboran en su investigación de la estructura y dinámica de la Vía Láctea. Townes, premio Nobel de física en 1964, es profesor emérito de astronomía de la Universidad de California en Berkeley. Recibió el doctorado en el Instituto de Tecnología de California en 1939. Ha publicado sobre radioastronomía y astronomía de infrarrojos, espectroscopía de microondas, estructura nuclear y molecular y electrónica cuántica. Continúa investigando sobre la naturaleza del centro galáctico y acaba de terminar un nuevo telescopio infrarrojo de alta resolución para observaciones más precisas de región tan misteriosa. Genzel dirige el Instituto Max Planck de física y astrofísica y es profesor visitante en la Universidad de California en Berkeley. Obtuvo el doctorado en física y astronomía en la Universidad de Bonn; su actual trabajo se centra también en observaciones de emisiones infrarrojas de fuentes galácticas y extragalácticas.

La región central de la Vía Láctea ha mantenido fascinados a los astrónomos durante decenios. Después de todo, nuestro centro galáctico se halla a sólo 25.000 años-luz, frente a los millones de años-luz de las galaxias más próximas; por ese motivo depositaron en esa región razonables esperanzas en lo concerniente a su observación y mejor conocimiento. Pero pasó mucho tiempo antes de poder contemplar, de manera directa, el centro de la galaxia y conocerlo, porque está envuelto en grandes nubes de gas y polvo, muy densas.

Descubrimientos recientes y nuevas técnicas han permitido, por fin, abordar dicho centro con algún detalle. Entre los avances técnicos recordemos los que han posibilitado captar y analizar radioondas astronómicas y radiación infrarroja, amén de los vuelos espaciales fuera de la atmósfera terrestre merced a los cuales se han detectado rayos X y rayos gamma de gran energía que emanan del centro de la galaxia.

Esos tipos de ondas —radio, infrarrojos, rayos X y rayos gamma— son semejantes a la luz visible por cuanto todos son formas de radiación electromagnética; difieren sólo en sus longitudes de onda y niveles de energía. Pero pueden, no así la luz, penetrar a través de las nubes interestelares de polvo con cierta facilidad y proporcionar una ventana por donde asomarse a la estructura y dinámica del centro galáctico. Cada dominio de longitud de onda revela aspectos distintos de las propiedades físicas de la región; por ejemplo, los rayos X son emitidos por gases muy calientes, mientras que gran parte de la radiación infrarroja emana de granos de polvo interestelar y gases más fríos. Los estudios en esas distintas longitudes de onda han aportado un cúmulo de información y nuevos conocimientos acerca de la zona central de nuestra galaxia. Han planteado, también, un sinfín de cuestiones.

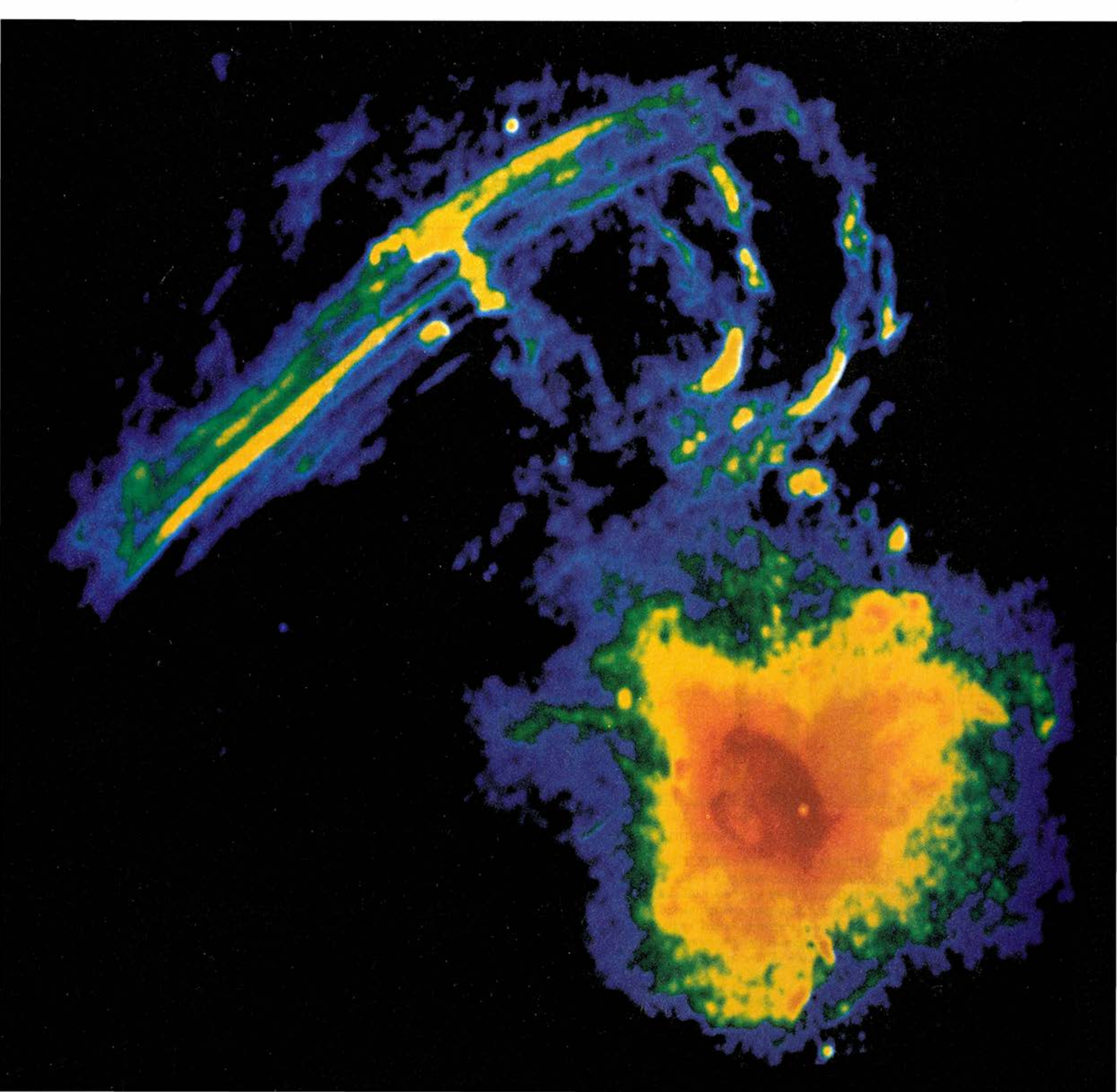
Las emisiones específicas del centro de nuestra galaxia fueron descubiertas por Karl Jansky a principios del decenio de 1930, aunque ni se le prestó la debida atención ni se aprovechó su trabajo hasta bastante después de la segunda guerra mundial. Jansky, que trabajaba en los laboratorios de la Bell Telephone, estaba examinando el ruido en frecuencia radio que podría afectar a la radiocomunicación a larga distancia. Explorando radiofrecuencias de unos 20 megahertz, halló que el ruido en radio adquiría especial intensidad en una dirección determinada. Con perseverancia de ingeniero responsable, halló que esa dirección variaba en relación con el día, la noche y la estación del año, como si estuviera fijo entre las estrellas. Con el tiempo, se dio cuenta de que la posición fija era la dirección en la que se creía residía el centro de nuestra galaxia.

1. CENTRO GALACTICO, sede de estructuras desorganizadas y radiación de alta energía. Estrechos arcos de gas, de unos 200 años-luz de longitud, emiten radioondas de 20 centímetros que se han cartografiado con las antenas de la Gran Distribución (VLA) en Socorro (Nuevo México). Largas y delgadas corrientes de materia (*azul*) emiten radiación generada por electrones en trayectorias espirales alrededor de las líneas del campo magnético; los arcos más prominentes que están próximos al centro (*rojo*) se hallan iluminados, así se cree, por radiación ultravioleta procedente de una fuente, hasta ahora sin identificar, situada cerca del centro de la galaxia.

Jansky comentó que el sonido del "ruido cósmico" era similar al generado por los electrones que se mueven en una resistencia eléctrica. Se sabe ahora que este radio-ruido es la radiación producida por los electrones que chocan con protones (núcleos de hidrógeno) en el gas caliente que rodea el centro galáctico y por electrones que se mueven en espiral en el seno de un campo magnético. En aquella época, el origen de esas radioondas era desconocido, y los astrónomos no creyeron que se pudiera sacar algo en claro de ellas.

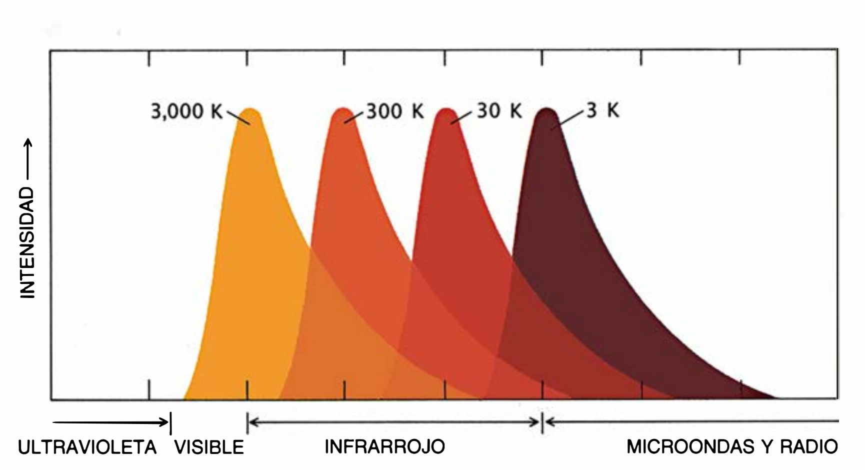
El desarrollo del radar y la electrónica de microondas durante la segunda guerra mundial despertaron el interés por las radiofrecuencias y estimularon la investigación del ruido cósmico. En muchos países se han erigido ahora enormes radioantenas para estudiar las radioondas de origen astronómico. Esos instrumentos han revelado gran cantidad de información acerca de las estructuras de las fuentes de radioemisiones y de los mecanismos que las producen. Particularmente fructífera se ha mostrado la técnica de radiointerferometría, por la que se conectan antenas múltiples para incrementar la sensibilidad y la resolución. Las señales recibidas por dos o más antenas separadas por miles de kilómetros se pueden combinar para dar el poder de resolución efectivo de un receptor de anchura igual a la distancia entre las antenas, técnica que se conoce como interferometría de línea de muy larga base. La Gran Distribución (VLA, de "Very Large Array"), conjunto de 27 antenas móviles situado en Socorro (Nuevo México), ha prestado un servicio extraordinario al estudio del centro galáctico.

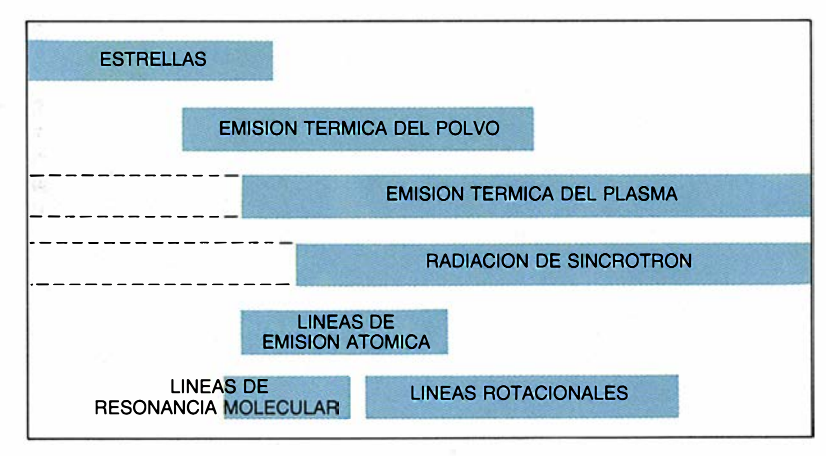
Un avance reciente y de importancia crucial ha sido la capacidad de detectar e identificar radioemisiones producidas por resonancias específicas de moléculas. Gracias a esta téc-

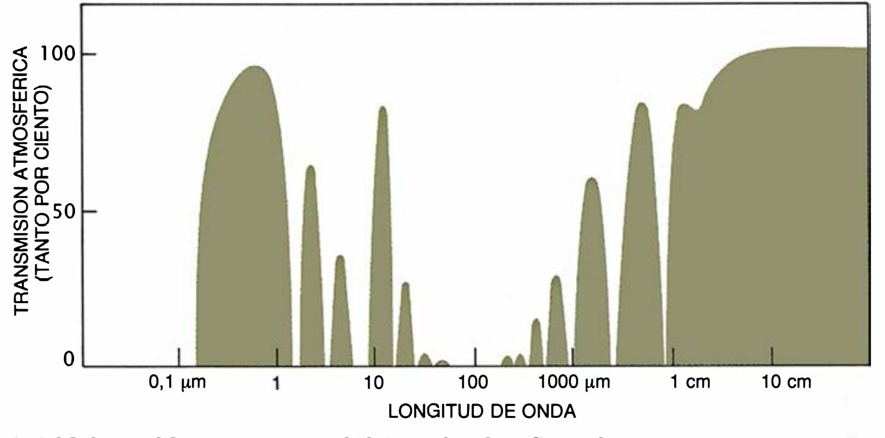


nica, los astrónomos no sólo pueden identificar la composición de las nubes de gas interestelar, sino también, analizando las características de las emisiones, determinar su densidad, movimientos, temperatura y la fuente de energía. No obstante, muchos estudios de las ondas radio procedentes del centro galáctico todavía se concentran en el radio-ruido que Jansky detectó y que no está asociado a las emisiones moleculares discretas, sino a un espectro continuo de frecuencias.

Tal radiación continua de la Vía Láctea la emiten principalmente regiones de gas ionizado, esto es, gas a cuyos átomos se les ha arrancado alguno de sus electrones o todos ellos. La radiación ultravioleta ioniza el gas; ionizado, el gas emite, a su vez, radiación en microondas en virtud de los choques entre los electrones y los protones (núcleos de hidrógeno). Parte de la radiación en microondas se debe a un mecanismo enteramente diferente: radiación de sincrotrón. En este caso, los electrones de alta energía describen trayectorias en espiral alrededor de los campos magnéticos y radian al moverse. La radiación de sincrotrón se emite desde una región globular próxima al centro galáctico; esa estructura constituye, probablemente, la reliquia de una explosión reciente que pudo superar la potencia de una supernova.







2. LOS OBJETOS EMITEN RADIACION ELECTROMAGNETICA a longitudes de onda características de su temperatura o estado energético. En general, cuanto más alta es la temperatura, tanto más corta es la longitud de onda a la cual radia un cuerpo (*arriba*). Los procesos moleculares, atómicos y nucleares producen radiación a longitudes de onda características, que revelan la composición y condiciones físicas de la distinta fuente radiante (*centro*). Por desgracia, la atmósfera terrestre es transparente sólo a algunas de esas longitudes de onda; para estudiar las otras, los instrumentos deben elevarse mediante globos, aviones o cohetes (*abajo*). (Dibujos de George V. Kelvin.)

Mediciones detalladas de la intensidad de las radioondas en la región más interna de nuestra galaxia (a menos de 10 años-luz del centro) revelan que gran parte de la materia ionizada allí existente se dispone en una especie de bandas o arcos, que han recibido una doble interpretación: serían materia que se está expulsando desde el centro o materia que está cayendo hacia ese lugar desde una órbita que lo rodea. Los arcos son bastante discontinuos; hay también, algo más separadas, manchas nubosas de gas ionizado [*véase la figura 3*].

La imagen en radio, mucho más detallada, del centro galáctico muestra arcos grandes y estrechos de unos 200 años-luz de longitud, descubiertos por Mark Morris, Farhad Yusef-Zadeh y Donald R. Chance con las antenas del VLA. Los arcos largos y delgados deben su brillo a la radiación de sincrotrón; los campos magnéticos asociados con la radiación han de estar orientados a lo largo de la dirección de los arcos, casi perpendiculares al plano de la galaxia. Los investigadores no han logrado aún medir con precisión la intensidad de los campos magnéticos, pero podría ser de hasta un miligauss, es decir, aproximadamente la milésima parte de la intensidad del campo magnético terrestre en la superficie. Las partículas de alta energía que se mueven en el seno de campos magnéticos cerca del centro galáctico, como se deduce de la radiación de sincrotrón, deberían también producir rayos X. De hecho, en esta región se observan rayos X bastante intensos.

Hay otras corrientes de materia y arcos por la vecindad que pudieran deberse asimismo a campos magnéticos, pero su forma no indica tal origen con claridad. Los autores, junto con Gordon J. Stacey y Andrew I. Harris, han estudiado la ionización de esas corrientes en el *Observatorio as-*

tronómico Kuiper —que va a bordo de un avión— y han hallado que algunos de los arcos más prominentes, y más cercanos al centro galáctico que las corrientes de materia más largas, tienen que ser resultado de un gas ionizado por la radiación ultravioleta.

El examen de la región central en una escala todavía mayor revela nuevas características llamativas, en particular una masa alargada de gas ionizado de unos 600 años-luz de longitud y escasas decenas de años-luz de anchura que se proyecta fuera del plano galáctico. Este lóbulo galáctico, así se le conoce, está rodeado por otras configuraciones todavía mayores aunque algo menos definidas. Dichos lóbulos sobresalen casi perpendicularmente del plano principal de la galaxia, prueba de que podrían haberse expulsado de la región central o hallarse quizá cayendo hacia ella procedentes de alguna fuente desconocida de alta latitud.

Un pequeño objeto, situado casi exactamente en el centro galáctico y llamado Sagitario A* (o Sgr A*), es la fuente de una radioemisión de notable intensidad. Su tamaño, intensidad y radiación relativamente constante lo singularizan entre los objetos conocidos de nuestra galaxia. Mediante radiointerferometría de línea de muy larga base, Kwok-Yung Lo, Donald C. Baker, de la Universidad de California en Berkeley, y otros colaboradores, han mostrado que este objeto abarca no más de una milésima de segundo de arco (un segundo de arco es 1/3600 de grado). A la distancia del centro galáctico —aproximadamente 25.000 años-luz— este ángulo corresponde a un diámetro de unos 1200 millones de kilómetros, que viene a ser el tamaño de la órbita de Júpiter alrededor del Sol. Sgr A* puede ser todavía menor, porque el gas y las nubes de polvo de nuestra galaxia tienden a distorsionar y difuminar las imágenes distantes antes de que alcancen la Tierra; el tamaño aparente puede obedecer a esa falta de definición.

La radiación infrarroja procedente del centro galáctico fue descubierta en 1967 en el marco de una búsqueda más sistemática que la que Jansky protagonizó cuando halló la radioemisión galáctica. Gerry Neugebauer y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), empleaban detectores de infrarrojos sensibles a longitudes de onda próximas a los 2,2 micrometros (tres o cuatro veces más largas que la radiación visible) para examinar fuentes infrarrojas astronómicas: estrellas gigantes frías y nubes de polvo de sus alrededores. Eric E. Becklin, alumno entonces de segundo ciclo del Caltech, pensó que sería interesante apuntar los detectores hacia el centro galáctico para ver si registraban alguna señal infrarroja. Descubrió que la región constituía una intensa fuente de rayos infrarrojos de corta longitud de onda. Becklin y Neugebauer cartografiaron la radiación infrarroja y hallaron que presentaba un intenso máximo por donde se creía que estaba el centro.

En años más recientes, los astrónomos han rastreado el centro galáctico a muchas longitudes de onda del infrarrojo en su afán por estudiar las estrellas, estrechamente agrupadas, el polvo calentado por las estrellas y la materia gaseosa que las rodea. Los espectros infrarrojos del gas contienen las líneas características de diversas moléculas, iones y átomos; cabe, pues, determinar los movimientos, estados de excitación y abundancias de esas substancias.

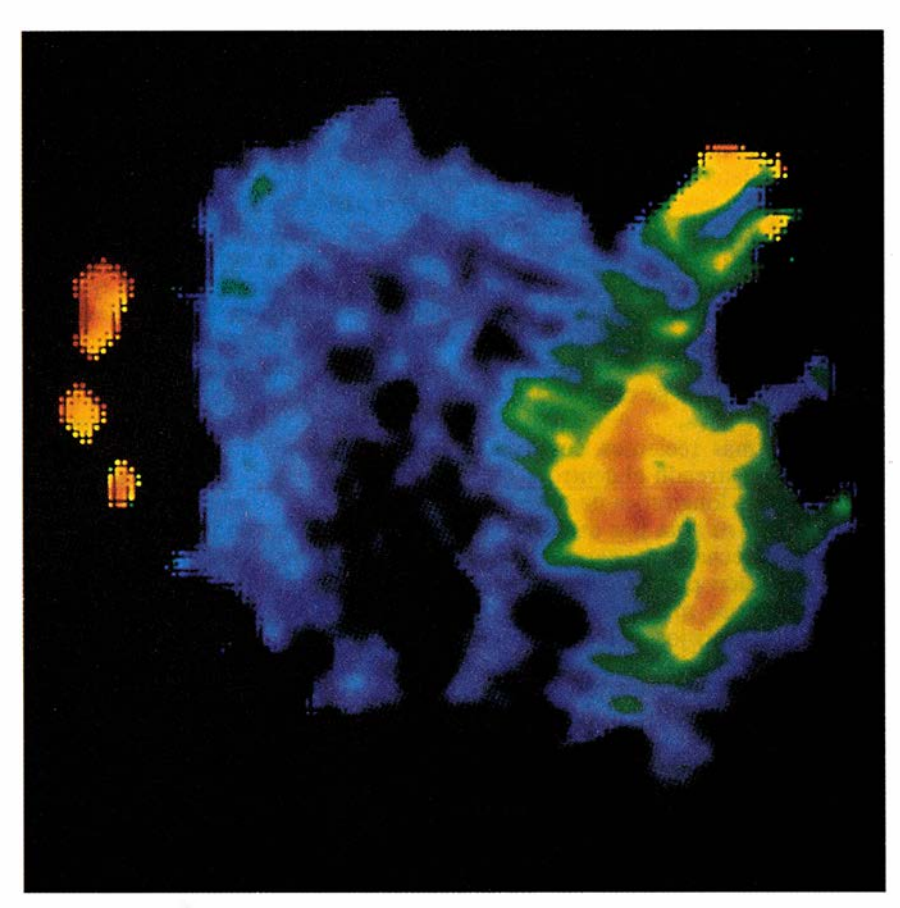
La información detallada del centro galáctico se ha obtenido gracias a un heterogéneo conjunto de instrumentos de nueva creación. Desde su instalación en tierra, los instrumentos examinan las longitudes de onda que la atmósfera deja pasar, verbigracia, la radiación de 2,2 micrometros observada por Becklin y Neugebauer, o la ventana de longitudes de onda próximas a los 10 micrometros, que nosotros hemos estudiado a fondo. Muchas longitudes de onda en el infrarrojo son absorbidas por la atmósfera y sólo se pueden registrar mediante instrumentos que se transporten hasta grandes alturas. Tales instrumentos se pueden montar a bordo de satélites en órbita terrestre (como el *Satélite astronómico infrarrojo*, o IAS), cohetes suborbitales o globos. Un instrumento particularmente valioso ha sido el *Observatorio astronómico Kuiper* o KAO, de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA), consistente en un avión C-141 de alta cota que aloja un telescopio de 90 centímetros estabilizado giroscópicamente. Desde este observatorio, Becklin, Ian Gatley y Michael W. Werner investigaron la radiación infrarroja en el dominio de 30 a 100 micrometros y detectaron un anillo tórico de polvo caliente de unos 10 años-luz de espesor, que rodea el centro de la galaxia y que parece girar en su entorno.

Las observaciones en rayos X y gamma de alta energía han deparado algunas sorpresas en relación con el comportamiento del centro galáctico. Los rayos gamma procedentes de la dirección de dicho centro fueron detectados en 1970 por medio de instrumentos elevados hasta la estratosfera en grandes globos de helio. En 1977, Marvin Leventhal y sus colaboradores, de los laboratorios Bell, midieron esos rayos gamma y hallaron que tenían una energía de 511.000 electronvolt (sirva de comparación que la luz visible tiene una energía de unos dos electronvolt), precisamente la energía desprendida en la aniquilación mutua de un electrón y un positrón, su antipartícula gemela. La intensidad de esta radiación procedente del centro galáctico correspondía a la aniquilación de enorme cantidad de antimateria: unos 10.000 millones de toneladas de positrones por segundo. Los vuelos de globos realizados desde 1977 han permitido comprobar que esta intensidad ha variado de forma espectacular: a lo largo de ocho años, se redujo hasta aproximadamente la cuarta parte, disminuyendo por debajo del umbral de detección y recuperando después su intensidad inicial.

La cantidad y extrema variabilidad de la radiación de aniquilación indican una fuente distinta de todas las conocidas en nuestra galaxia. La fuente parece encontrarse en algún lugar próximo al mismo centro, pero su posición exacta sigue ignorada. La determinación definitiva del origen de esta misteriosa radiación deberá aguardar hasta el lanzamiento de un instrumento que opere desde el espacio y sea capaz de localizar con ajustada precisión las fuentes de rayos gamma de gran energía.

La radiación de aniquilación se puede producir en la vecindad de objetos colapsados y extremadamente densos, las estrellas de neutrones. Una de éstas en órbita alrededor de una estrella normal puede arrancar materia de su compañera, creando estallidos de energía —y tal vez de antimateria y de radiación de aniquilación— conforme la materia es atraída hacia su superficie. Esta clase de radiación puede también ser producida por un objeto todavía más colapsado, un agujero negro, acerca del cual tendremos que volver a hablar más tarde.

William A. Mahoney, Allen S. Jacobson y sus colaboradores, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena (California), han detectado rayos gamma de energías todavía mayores, de 1,8 millones de electronvolt, emanando del centro galáctico. Esta energía es característica de la ra-



3. RADIOEMISION procedente de la inmediata vecindad del centro galáctico; denuncia un pasado violento. La radiación ultravioleta de alta energía procedente de la fuente cercana a la región central ioniza los átomos de hidrógeno, rompiéndolos en sus componentes: protones y electrones. El rojo y el amarillo delimitan regiones que emiten microondas como resultado de choques entre electrones y protones; cuanto más oscuro el rojo, tanto más intensa la radiación. Las zonas azules perfilan radiación de microondas más débil generada por electrones de alta energía, acelerados, probablemente, por una explosión de supernova, conforme describen trayectorias en espiral alrededor de los campos magnéticos. La forma globular de la región azul constituye una reliquia verosímil de una enorme explosión ocurrida cerca del centro galáctico que tal vez excedió a la supernova más potente.

diación emitida durante la desintegración del aluminio 26, isótopo radiactivo del aluminio normal. Lo mismo que ocurre con la radiación de aniquilación, la cantidad total de materia involucrada es ingente: diríase que la masa de aluminio radiactivo en la región equivale a la masa de varias estrellas. A tenor del estado actual del conocimiento, el aluminio 26 se produce solamente en explosiones estelares violentas (novas y supernovas) o en objetos de gran masa, calientes y furiosamente activos, las estrellas de Wolf-Rayet. En estas últimas, el aluminio 26 se genera en cantidades bastante pequeñas; posiblemente hay que atribuir la producción de esa pasmosa cantidad de aluminio 26 al gran número de supernovas próximas al centro galáctico.

Además de la radiación creada por procesos específicos e identificables, la región galáctica central emite, en apreciable cuantía, radiación X continua. Este año se lanzarán dos importantes observatorios espaciales de rayos X y rayos gamma, el *Observatorio de rayos gamma* (GRO) y el *Satélite Roentgen* (ROSAT), que habrán de ayudar a localizar las fuentes de rayos X y la radiación de antimateria y de aluminio 26 en la región activa alrededor del centro galáctico.

Aunque los descubrimientos relativos a las bandas de rayos X y gamma son notables, el trabajo espectroscópico más extenso y revelador del centro galáctico se ha realizado en las longitudes de onda infrarrojas y de radio, en las que se observó el centro por primera vez. Se ha estudiado con especial interés la parte del radioespectro correspondiente a la emisión de 21 centímetros del hidrógeno atómico. El hidrógeno es el átomo más abundante del universo, lo que compensa la connatural debilidad de su radiación. En las regiones de la Vía Láctea donde las nubes de gas interestelar no adquieren una densidad sobresaliente, la radiación ultravioleta se distingue por su intensidad excesiva y el hidrógeno se encuentra sobre todo en forma de átomos aislados y eléctricamente neutros; la radioseñal característica de este hidrógeno atómico se ha cartografiado con minuciosidad para discernir los grandes rasgos de nuestra galaxia.

A partir de los 1000 años-luz desde el centro galáctico, la emisión del hidrógeno atómico proporciona un buen cuadro de la rotación de la galaxia y la estructura de sus brazos espirales. No suministra mucha información sobre las condiciones reinantes en las cercanías del centro porque el hidrógeno tiende a darse allí en forma molecular o ionizado (el hidrógeno se disocia en un protón y un electrón).

Las espesas nubes de hidrógeno molecular oscurecen el centro galáctico y los objetos más distantes en el plano de nuestra galaxia, vistos desde la Tierra. Afortunadamente, los telescopios de microondas e infrarrojos pueden atravesar las nubes y revelarnos lo que contienen y lo que hay detrás de ellas, en el centro. Además de hidrógeno molecular, las nubes poseen grandes cantidades de monóxido de carbono (CO), molécula estable cuya longitud de onda característica está en torno a los tres milímetros. Esta radiación penetra en la atmósfera terrestre. Puede medirse con radioantenas desde la superficie de la Tierra; el CO, abundante en virtualmente todas las nubes oscuras, es muy útil para cartografiar tamaños y densidades de éstas. Midiendo los corrimientos Doppler (cambios en la frecuencia y longitud de onda de una señal causados por los movimientos de un objeto que, avanzando hacia el observador o alejándose del mismo, emite una señal) se puede también inferir las velocidades de las nubes.

Las nubes oscuras tienden a ser muy frías, unos 15 kelvin, esto es, −260 grados Celsius; gran parte del CO que encierran se halla, por tanto, en bajos estados de energía y emite a frecuencias bastante bajas en la región milimétrica. Parte de la materia próxima al centro galáctico está evidentemente mucho más caliente. Gracias al *Observatorio astronómico Kuiper*, los autores, junto con Dan M. Watson, John W.V. Storey, John B. Lugten y otros colegas de la Universidad de California en Berkeley, hemos detectado emisiones de CO de mayor energía en la región del infra-

rojo lejano, que indican temperaturas de unos 400 kelvin, aproximadamente el punto de ebullición del agua. El gas se calienta con la radiación ultravioleta del centro galáctico y, tal vez también, con ondas de choque generadas cuando las nubes que se mueven en torno al centro galáctico chocan entre sí. La radiación ultravioleta atraviesa las apretadas nubes y calienta el gas de las cercanías. Así, la temperatura desciende conforme aumenta la distancia al centro, y llega a ser mucho más elevada que los 10 o 15 kelvin típicos de las nubes no asociadas al centro.

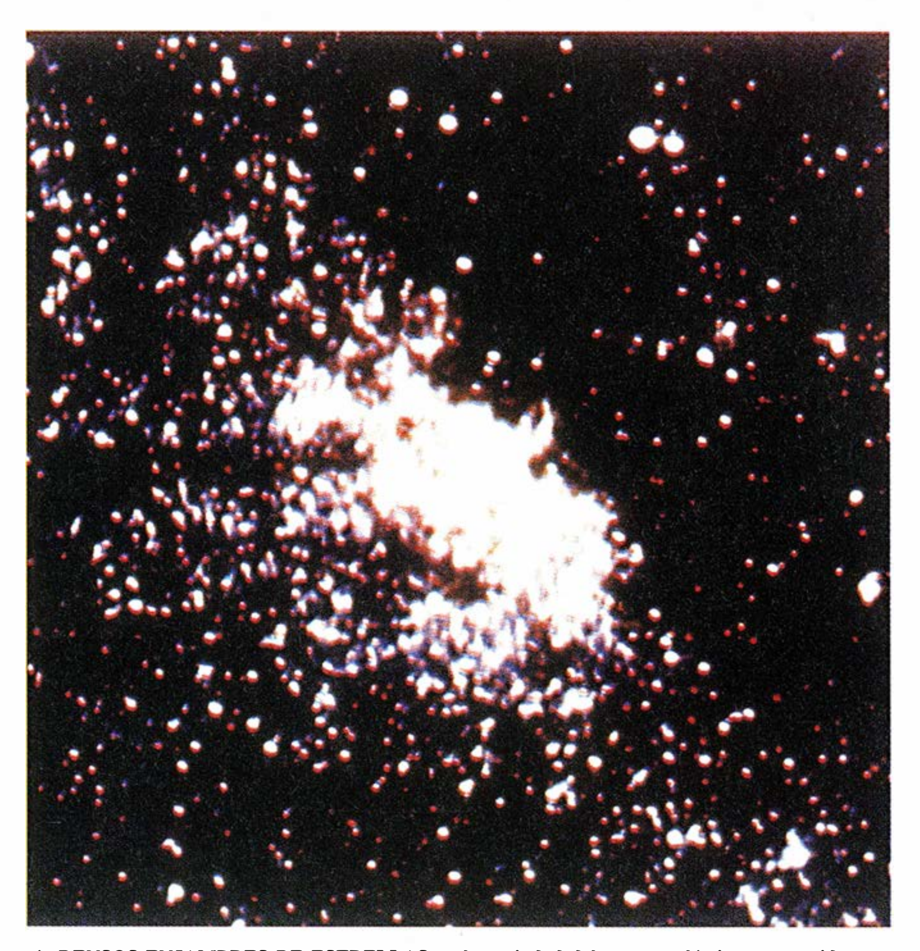
Los espectros de los átomos de oxígeno y de carbono ionizado proporcionan información adicional sobre la temperatura y densidad del gas. Otras moléculas que han merecido una investigación pormenorizada son el cianuro de hidrógeno (HCN), hidroxilo (OH), monosulfuro de carbono (CS) y amoníaco (NH_3). Nuestro grupo de Berkeley, en el que trabajan Melvyn C.H. Wright y Rolf Güsten, ha obtenido, con el radiointerferómetro de la Universidad de California, un mapa de alta resolución de la emisión del HCN. Aporta una imagen definida de un disco bastante irregular y compacto de nubes moleculares calientes que rodean un agujero vacío, o cavidad, de unos 10 años-luz de diámetro en el centro de la galaxia. Como el disco está inclinado respecto a la visual desde la Tierra, el agujero circular muestra una forma elíptica [*véase la figura 5*].

Los átomos de carbono y oxígeno, algunos ionizados por la luz ultravioleta, están mezclados con el gas molecular del disco. Los mapas de las líneas de emisión infrarroja y radio de esos iones y átomos y de diversas moléculas muestran que el disco de gas circula alrededor del centro galáctico a una velocidad de unos 120 kilómetros por segundo y que el gas está caliente y agrupado en bolsas. Las mediciones revelan también la presencia de algunas nubes cuyos movimientos no se ajustan en absoluto a esta pauta general de circulación; tal vez se trata de materia que ha caído desde cierta distancia. La luz ultravioleta de la región central incide sobre el borde interno del disco de nubes, creando un círculo casi completo de materia ionizada; hay también corrientes de materia ionizada y bolsas de gas dentro de la cavidad central. Varios investigadores, entre ellos Lo, Robert L. Brown y Ronald D. Ekers, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, han utilizado las antenas del VLA para cartografiar esas estructuras con magnífico detalle.

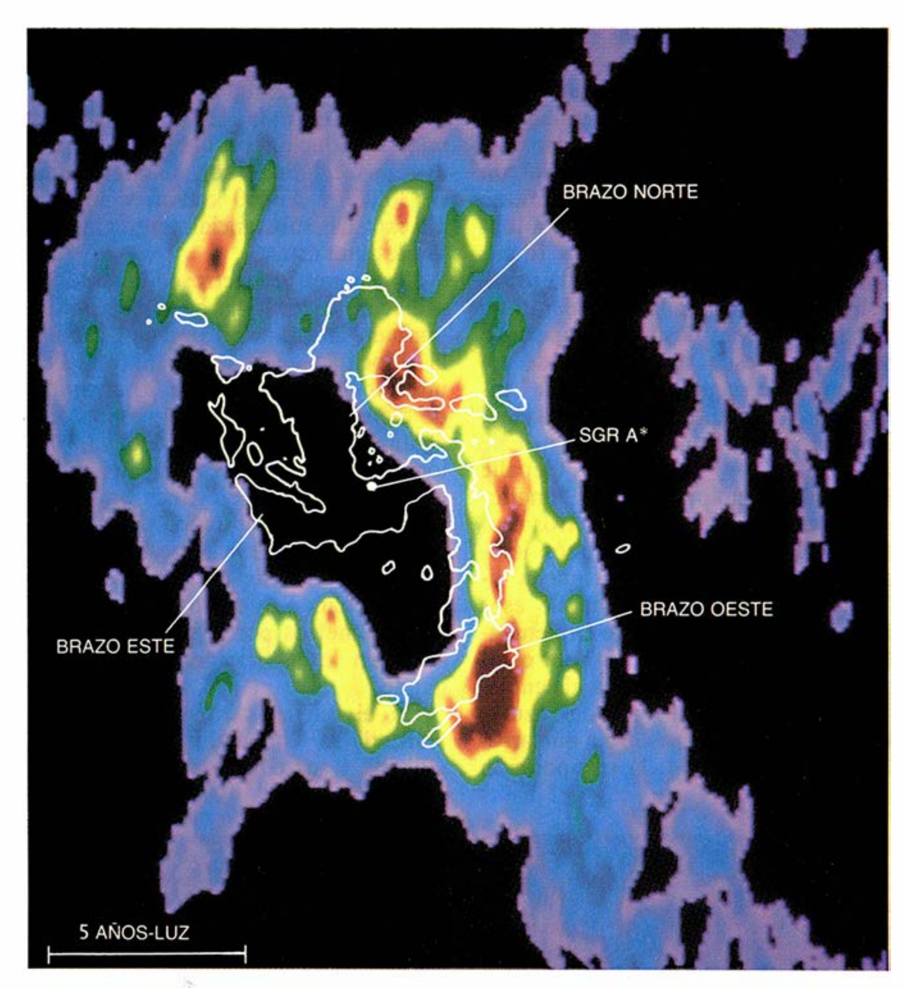
Algunos elementos ionizados bastante abundantes —así, el neón al que falta un electrón, el argón con dos electrones de menos y el azufre con tres electrones arrancados— emiten prominentes líneas espectrales a longitudes de onda cercanas a los 10 micrometros, porción de la banda infrarroja que penetra en la atmósfera y se puede observar desde la superficie terrestre. Desde sus tiempos de estudiantes de segundo ciclo en la Universidad de California en Berkeley, John H. Lacy, Eugene Serabyn, Eric R. Wollman y Thomas R. Geballe han venido explorando esas longitudes de onda con espectrómetros sensibles. Han hallado que el neón ionizado una sola vez es, con mucha diferencia, el más abundante de esos elementos, y que el azufre triplemente ionizado está ausente casi por completo en la materia próxima al centro. Arrancar tres electrones del azufre requiere mucha más energía que arrebatarle uno al neón; la composición de la materia indica que la radiación ultravioleta abunda en la región central, pero se trata de radiación de moderada energía. La radiación fue, pues, producida probablemente por estrellas calientes con temperaturas de 30.000 a 35.000 kelvin, y no hay allí estrellas substancialmente más calientes que éstas.

El examen espectroscópico de la radiación de los iones ha suministrado también información detallada sobre la velocidad de la tenue materia del interior de la cavidad de 10 años-luz de diámetro que rodea el centro. En algunas partes de la cavidad, las velocidades son similares a las del anillo giratorio de gas molecular, unos 110 kilómetros por segundo. Cierto número de nubes de la parte interior de la región se mueven a velocidades apreciablemente mayores, de unos 250 kilómetros por segundo; algunas alcanzan los 400 kilómetros por segundo.

En el mismo centro, Donald N. Hall, de la Universidad de Hawai, Geballe y sus colaboradores han de-



4. DENSOS ENJAMBRES DE ESTRELLAS en la vecindad del centro galáctico, oscurecidos por espesas nubes de gas y polvo. Los rayos infrarrojos de longitudes de onda de unos dos micrometros atraviesan parcialmente las nubes y revelan la distribución de estrellas, de otra manera invisible. Esta imagen se obtuvo con un avanzado dispositivo detector. La masa que se calcula a las estrellas observadas resulta, sin embargo, inadecuada para explicar sus rápidos movimientos cerca del centro.



5. MOLECULAS DE CIANURO DE HIDROGENO en las calientes y densas nubes próximas al centro galáctico. Emiten radio en corta longitud de onda, según revela este mapa obtenido con el telescopio de longitudes de onda milimétricas de la Universidad de California. El gas más frío situado detrás no es visible en estas longitudes de onda. En el corazón de la galaxia existe una distribución elíptica de gas con una región vacía en el centro. El gas, distribuido en bolsas, varía su intensidad de emisión, prueba de una perturbación reciente, con toda probabilidad en los últimos 100.000 años.

tectado materia ionizada con velocidades de hasta 1000 kilómetros por segundo. Esta materia está asociada a un interesante conjunto de objetos cerca del centro de la cavidad, conocido como IRS16, descubiertos por Becklin y Neugebauer durante una investigación de fuentes de radiación infrarroja de corta longitud de onda. La mayoría de las pequeñas fuentes que encontraron parecen ser estrellas únicas de gran masa, pero IRS16 (su 16ª fuente infrarroja) es diferente: con posterioridad se ha resuelto en aproximadamente cinco brillantes e insólitas componentes.

La región central entera, disco caliente de gas y cavidad interna, parece haber sido escenario de alguna perturbación violenta y relativamente reciente. Un anillo o disco de gas en rotación en torno al centro galáctico debería, con el tiempo, convertirse en una estructura alisada como resultado de los choques entre porciones de materia, del disco, que se mueven con rapidez y otras más lentas. Los corrimientos Doppler revelan diferencias de velocidades de algunas decenas de kilómetros por segundo entre distintas porciones de materia del anillo de gas molecular. Esas porciones deberían chocar y uniformarse entre sí en una escala de tiempo de unos 100.000 años, lo que supone entre una y dos rotaciones en torno al centro. Evidentemente, el gas ha sufrido una intensa perturbación durante ese tiempo —posiblemente por una explosión de energía procedente del centro o por una caída de materia desde cierta distancia—; los choques entre porciones deben ser todavía lo bastante violentos para producir ondas de choque en el gas. La exactitud de estas conclusiones se pone a prueba mediante la búsqueda de rastros de ondas de choque.

A partir de las líneas espectrales resultantes de moléculas calientes y altamente excitadas, se identifican las ondas de choque. Tales moléculas han sido observadas por el *Observatorio astronómico Kuiper*; hay, entre ellas, radicales hidroxilo, que son fragmentos de moléculas de agua rotas por procesos de alta energía. Se ha encontrado también radiación infrarroja de corta longitud de onda procedente de moléculas calientes de hidrógeno que muestra que, en algunos lugares, la temperatura de la nube molecular alcanza los 2000 kelvin, temperatura que efectivamente sería producida por ondas de choque.

¿Cuál es la fuente de las densas nubes moleculares de polvo que hay cerca del centro? La materia contiene elementos pesados, lo que denuncia su elaboración en el interior de las estrellas, donde las reacciones nucleares provocan la fusión del hidrógeno y helio para producir elementos más pesados: carbono, oxígeno y nitrógeno. Las estrellas antiguas se dilatan y expulsan grandes cantidades de materia o, en algunos casos, explotan en forma de supernovas; de una u otra manera, se inyectan elementos pesados en el espacio interestelar. Las nubes próximas al centro parecen haber sufrido un proceso más elaborado dentro de las estrellas que la materia más alejada del centro, porque ciertos isótopos raros que se forman sólo en el interior estelar abundan sobremanera en esta región.

No toda esta materia tuvo que ser necesariamente producida por primitivas estrellas en las inmediaciones del centro; algunas nubes han caído, quizás, hacia dentro. El rozamiento y el campo magnético galáctico arrastran poco a poco la materia hacia el centro; sería por tanto de esperar que allí se acumulase una gran cantidad de materia. Más tarde consideraremos lo que podría haber ocurrido con ella.

Aun cuando las estrellas de la vecindad del centro galáctico no se puedan observar con medios ópticos, pueden detectarse a longitudes de onda en el infrarrojo entre dos y tres micrometros. Estas longitudes de onda, ligeramente mayores que la de la luz visible y características de objetos a temperaturas estelares, se difunden y absorben por el polvo entre la Tierra y el centro de la misma manera que la luz visible. Pese a ello, nos llega la suficiente radiación infrarroja para permitir la medición de la concentración de estrellas en esta región; esta es la radiación que Becklin y Neugebauer descubrieron cuando apuntaron sus instrumentos de infrarrojos hacia el centro galáctico.

Tales mediciones muestran que en la región interna de la galaxia la densidad de estrellas es muy alta y aumenta hacia el centro. La distancia

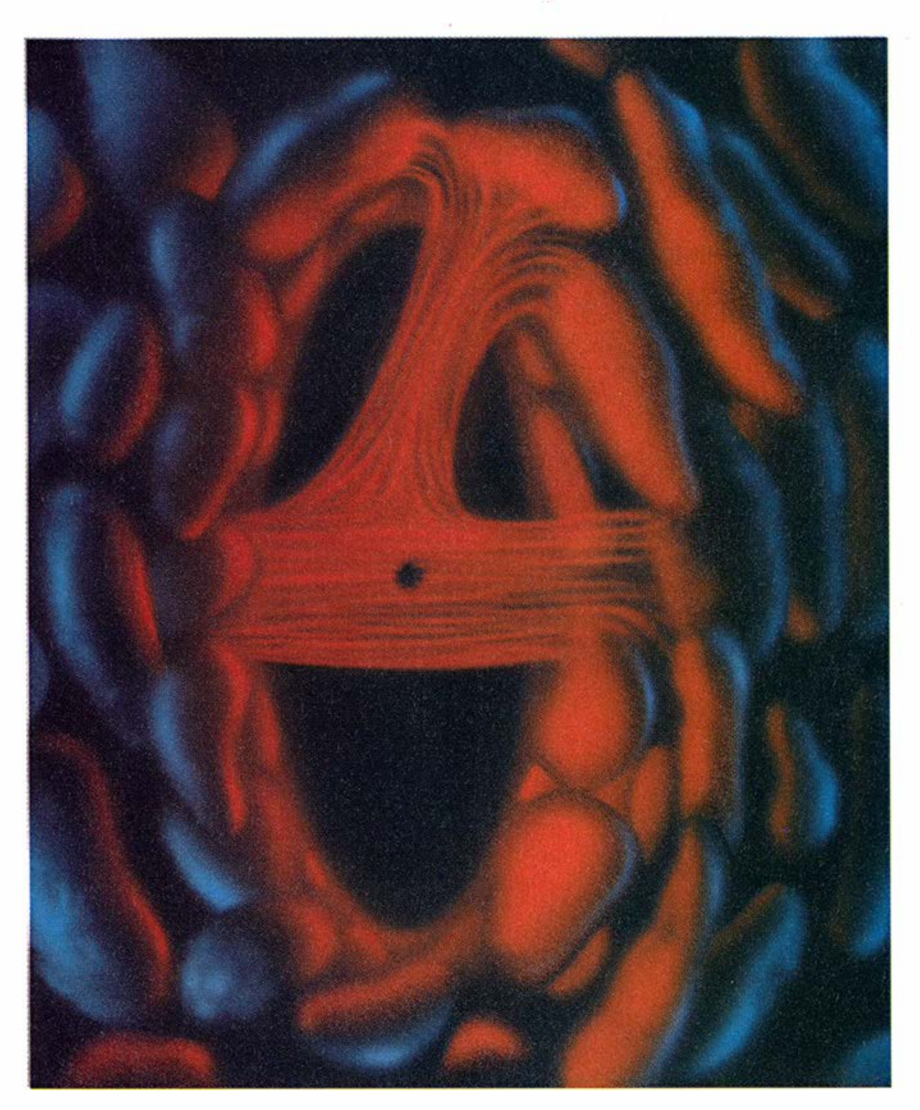
media entre estrellas es quizá de 1/300 de la distancia entre el Sol y su vecina más próxima; bajo esas condiciones, cada 100 millones de años, más o menos, una estrella se acercará lo suficiente a alguna de sus vecinas para que cada una desvíe la trayectoria de la otra y compartan su energía cinética, o energía del movimiento. En virtud de ello, la velocidad esperada de una estrella en el cúmulo central debe ser la misma que la de cualquier otra.

Para que todas las estrellas tengan la misma velocidad esperada y estén ligadas entre sí por su campo gravitatorio mutuo, deben seguir una distribución particular. En el caso ideal, la densidad estelar es proporcional a $1/R^2$, donde R representa el radio o distancia desde el centro. La masa total de las estrellas dentro de un radio dado es simplemente proporcional a R; el campo gravitatorio es inversamente proporcional a la distancia al centro.

De las mediciones de su emisión infrarroja de onda corta se desprende que el denso cúmulo de estrellas en el centro de nuestra galaxia sigue aproximadamente la distribución teórica ideal; sería, por tanto, de esperar que las estrellas y demás objetos de esta región describiesen órbitas en torno al centro, a velocidades bastante parecidas. De hecho, las velocidades de los movimientos del gas, en particular los de los gases ionizados en el interior de la cavidad central, aumentan de forma sorprendente hacia el mismo centro de la galaxia. Las estrellas detectables en el infrarrojo no dan cuenta, eso parece, de toda la masa responsable del campo gravitatorio. Descubrimiento que aportó la primera prueba razonablemente clara de la existencia, cerca del centro, de un objeto de gran masa no detectado. Diversos investigadores apelaron a fuerzas no gravitatorias para explicar las altas velocidades: intensos campos magnéticos o vientos interestelares. El conocimiento cada vez más detallado de las condiciones en las vecindades del centro indica que ninguna de esas fuerzas propuestas sería la adecuada.

Hace poco, los astrónomos consiguieron medir velocidades estelares en esta región. Mediciones posibles gracias a que muchas estrellas de la vecindad del centro son gigantes rojas, estrellas intrínsecamente brillantes que radian con intensidad en el infrarrojo de corta longitud de onda y que contienen, en sus atmósferas, una cuantía notable de CO. El examen de los característicos espectros del CO de esas estrellas permite determinar sus movimientos. Tales mediciones han sido realizadas por George H. Rieke y Marcia H. Rieke, de la Universidad de Arizona. En particular, recientes mediciones de Kristen Sellgren, Martina T. McGinn y sus colaboradores, que trabajan en Mauna Kea (Hawai), muestran con claridad que las velocidades estelares, como las de los gases, aumentan hacia el centro de la galaxia. Los movimientos de las estrellas y el gas se comportan como si la región de uno o dos años-luz en torno al centro alojara una masa de tres a cuatro millones de soles: mucho más de lo que cabría esperar de sólo las estrellas.

Las mediciones de la materia que cae hacia el centro galáctico posibilitan calcular cuánta masa se acumula allí. La materia parece caer hacia el centro por difusión y por choques entre las nubes, a razón de aproximadamente una masa solar cada 1000 años. Si nuestra galaxia ha permanecido en unas condiciones semejantes a las actuales durante 5000 millones de años, lo que constituye quizás una hipótesis razonable, y si la materia se ha ido acumulando a lo largo de ese tiempo, la masa total caída debe ascender a unos cinco millones de masas solares, cifra afín a los tres o cuatro millones de masas solares estimadas a partir de las atracciones gravitatorias observadas.



6. BANDAS, FILAMENTOS Y ANILLOS de gas y polvo rodean el centro de la Vía Láctea. En las regiones interiores del anillo, los átomos se hallan ionizados y en alto estado energético, debido, principalmente, a la radiación ultravioleta procedente de la región central interna que incide sobre los bordes próximos de las muchas y espesas nubes (*regiones rojas*). Las nubes más externas están protegidas; contienen, pues, átomos y moléculas apenas perturbados. El anillo circula en torno al centro; las porciones que lo hacen más deprisa y las que se mueven más lentas chocarán entre sí con el tiempo. Algo de gas parece haberse arrancado del anillo y atraído hasta el centro, pero el origen y los movimientos de los filamentos horizontales de gas no están claros. Un agujero negro de gran masa alojado en el centro pudo haber desencadenado un estallido que ayudó a formar esta estructura.

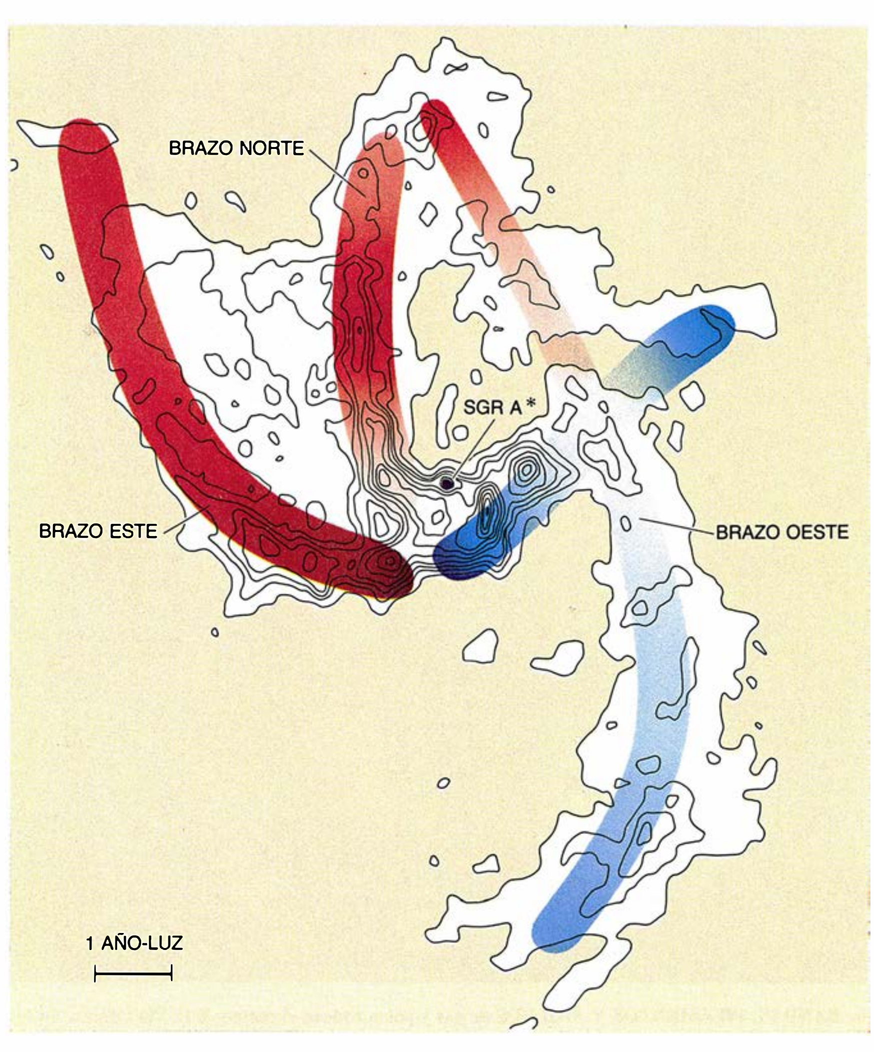
Tal vez, la materia que cae hacia el centro no se quede allí, sino que forme nuevas estrellas que pueden ser empujadas lejos del centro por las colisiones, quedando redistribuidas en el cúmulo estelar central. Los cálculos, por sí solos, no bastan para revelar cuál de esas alternativas acontece en realidad. Pero hay buenas razones para suponer que la materia que cae se halla todavía concentrada en el centro de la galaxia. ¿Cómo podría acumularse allí tanta masa y permanecer, no obstante, indetectable? La respuesta obvia es que haya formado un agujero negro.

Las ecuaciones de la relatividad general de Einstein permiten la existencia de una masa colapsada en virtud de cuya ingente densidad nada escape de su campo gravitatorio, ni siquiera la luz. John A. Wheeler, entonces en la Universidad de Princeton, bautizó a esos objetos con el nombre de agujeros negros porque no emiten radiación. El centro de una galaxia constituye un lugar natural para un agujero negro, ya que es un sumidero gravitatorio; la masa circundante se agrupa inevitablemente en el centro y es razonable que pudiera adquirir la masa crítica y la densidad necesarias para crear un agujero negro. A medida que fuera cayendo más materia en él, se aceleraría hasta casi la velocidad de la luz y se calentaría por rozamiento hasta temperaturas elevadísimas. Un agujero negro podría así producir intensa luz y radioemisiones del tipo observado en Sgr A*. La radiación no emanaría del objeto mismo, que permanece aislado del resto del universo, sino de la materia dotada de alta energía que cae en él.

¿Podrían otras clases de objetos explicar las características observadas del centro? Algunos investigadores proponen que la masa invisible sea un conjunto de estrellas oscuras cerca del centro. La principal objeción contra esa idea la presentan las estrellas oscuras, cuya masa no supera la de las estrellas más brillantes (y con frecuencia es bastante menor). Podría tratarse de enanas pardas, objetos demasiado pequeños para brillar por medio de reacciones nucleares internas, o tal vez estrellas de neutrones, restos colapsados de estrellas antiguas que han dejado de radiar.

El sumidero gravitatorio del centro de la galaxia atrae a los objetos más pesados con mayor intensidad que a los más livianos. Los encuentros entre objetos livianos y pesados expulsarán, con el tiempo, a los primeros de esta región; las estrellas oscuras de pequeña masa deberían, por tanto, haber sido expulsadas por estrellas más brillantes y de mayor masa. Las propias estrellas de neutrones, de masa equiparable a la de las estrellas normales, deberían mostrar la amplia dispersión que ofrecen las estrellas visibles agrupadas en torno al centro. Resumiendo, la única clase de estrellas conocidas que no producirían suficiente radiación infrarroja para denunciar su presencia no podrían agruparse en el centro por mucho más tiempo que el que corresponde a los encuentros estelares de esa zona, unos 100 millones de años, lapso corto si se compara con la edad de la galaxia. A tenor de los conocimientos actuales, el único objeto que podría ejercer la atracción gravitatoria observada, y no obstante permanecer invisible, sería un agujero negro de unos tres millones de masas solares.

El agujero negro del centro podría ser muy pequeño, pese a su gran masa. Un agujero negro con una masa de unos tres millones de estrellas normales sólo tendría un "radio" similar al de una estrella ordinaria, el Sol por ejemplo. (Llámase "radio" a la máxima distancia desde donde nada puede escapar.) Sería un objeto nada espectacular, pequeño; en el enjambre de estrellas cerca del centro galáctico, una aguja en un pajar. Podría esperarse que al menos algo de materia estuviera siempre goteando hacia la masa central, radiando intensamente en su caída; cabría entonces la posibilidad de localizar el agujero negro en la indagación de las emisiones particulares que produciría esta materia en caída hacia su interior.



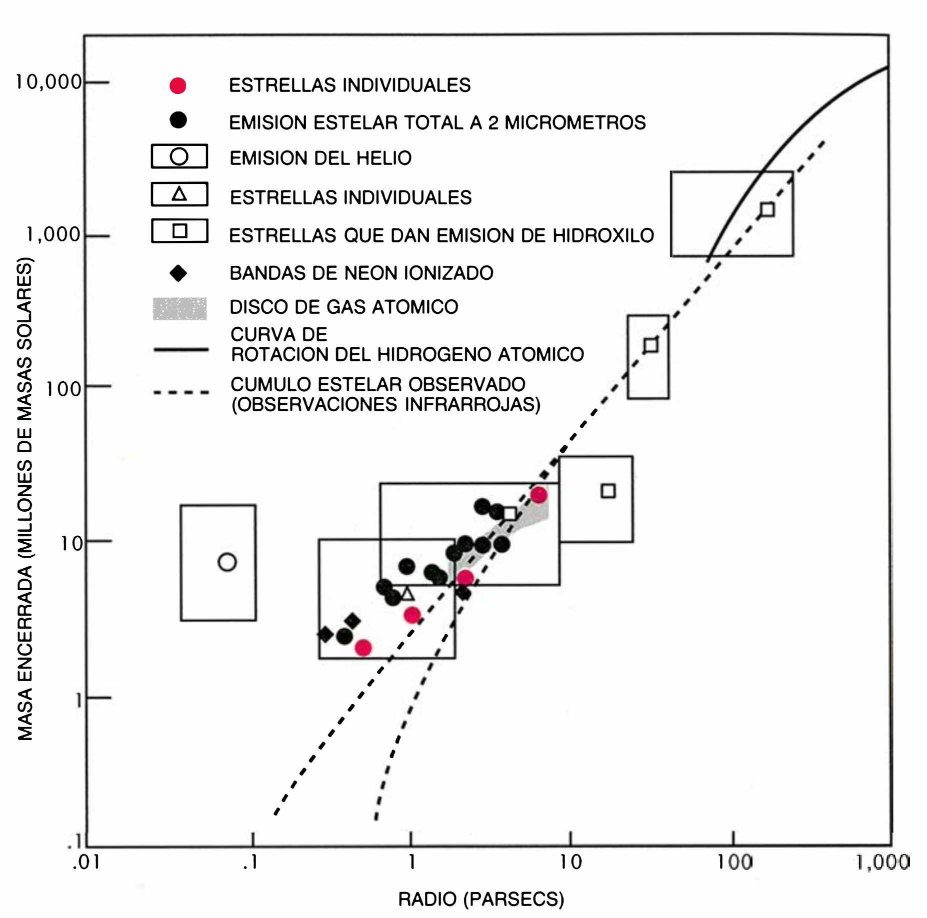
7. VELOCIDADES EN EL ANILLO DE GAS cerca del centro. Se determinan midiendo los corrimientos en la radiación allí emitida. El movimiento hacia la Tierra acorta la longitud de onda (*más azul*); el de alejamiento la alarga (*más rojo*). Las nubes giran a unos 110 kilómetros por segundo; algunas bolsas se mueven 10 o 20 kilómetros por segundo más deprisa o más despacio. El mapa de radiointensidad muestra bandas de gas que se están expulsando de la región o cayendo en ella desde el exterior. La intensa radiofuente de la vecindad del centro es la misteriosa Sagitario A*. Su pequeño tamaño, prodigiosa emisión y radiación generalmente constante la singularizan entre todas.

Una estrella podría, ocasionalmente, pasar cerca del agujero negro. La destruirían las fuerzas de marea; parte de su materia formaría un disco de gas que se movería en espiral hacia dentro. De acuerdo con los cálculos teóricos, al ir cayendo materia en un agujero negro se puede formar antimateria, y ésta convertirse en fuente de la radiación de aniquilación que emana de la región central. La materia que cae puede también producir intensa radioemisión; así, la radiofuente Sgr A*, compacta y potente, parece ser un candidato verosímil para el agujero negro. Alrededor de una estrella de neutrones, pueden crearse, por otro lado, radioemisión y radiación de aniquilación. La distinción más fácilmente observable entre una estrella de neutrones y el supuesto agujero negro se establece en la enorme diferencia de masas.

Baker y Richard A. Sramek, del Observatorio de Radioastronomía, han consagrado siete años a la observación de Sgr A* y han demostrado que, en todo ese tiempo, no se ha movido más de una décima de su diámetro; a menos que se esté moviendo a lo largo de la visual desde la Tierra, su velocidad es notablemente menor que la de la mayoría de los demás objetos en la proximidad del centro galáctico. Este descubrimiento abona la idea que concibe Sgr A* como un objeto de enorme masa, apenas perturbado por atracciones gravitatorias, ni siquiera en el denso centro de la galaxia. Tal vez constituya su masa central: un macizo agujero negro a cuyo alrededor describen órbitas los demás objetos. Podría ser también la fuente de parte de la radiación de aniquilación y la causa de los agitados movimientos de su entorno. Esta hipótesis deja todavía sin explicar algunos fenómenos, verbigracia, la intensa radiación ultravioleta del centro galáctico. Si la materia que cae en Sgr A* fuera responsable de esta radiación, el objeto emitiría una intensa radiación infrarroja que no se observa.

Es probable que el presumible e ingente agujero negro del centro de nuestra galaxia se mostrara más activo en el pasado que en la actualidad. La densidad estelar en la vecindad del centro es tal que, cada pocos miles de años, una estrella ha de pasar suficientemente cerca del agujero negro para ser convertida en escombros. El estallido resultante habrá de ser espectacular, aunque breve, tal vez de sólo algunos años de duración, según cálculos de Martin J. Rees, de la Universidad de Cambridge. Un gran agujero negro central atravesaría probablemente la mayor parte de su vida en un estado de quietud —el estado en el que tendría que hallarse ahora—, pero las violentas acciones del pasado tendrían que haber dejado señales detectables. Quizá la cavidad central es el resultado de una explosión que aconteció hace de 10.000 a 100.000 años y el gas molecular que lo rodea, compacto y perturbado, guarda la memoria de ese violento episodio.

Como la Vía Láctea, la mayoría de las galaxias parecen tener regiones internas bastante apacibles, pero de algunas salen potentes emisiones de radio e infrarrojos y largos chorros de materia de gran velocidad, expulsados, por lo que se infiere, del centro. La cuantía de energía liberada por las galaxias activas parece excesiva para haber sido generada sólo por energía nuclear; para muchos astrónomos, la energía se produce por materia que cae en un agujero negro.



8. ATRACCIONES GRAVITATORIAS cerca del centro galáctico; nos indican la cantidad de materia presente. La intensidad de la gravedad se infiere de los movimientos orbitales de las estrellas y las nubes. Las mediciones de esos movimientos se han representado junto con las que serían de esperar (*líneas de trazos*) si las estrellas observadas en el infrarrojo justificaran toda la masa. A grandes distancias, la teoría y la observación concuerdan, pero a distancias de pocos años-luz del centro, las velocidades parecen ser anormalmente altas. Los objetos allí situados sufren la atracción de un objeto de gran masa y, pese a ello, invisible: un agujero negro, quizá. (Esquema de Johnny Johnson.)

Al menos de dos galaxias próximas, la de Andrómeda y otra menor en la constelación del Triángulo, se cree que contienen agujeros negros, aun cuando se trata de galaxias bastante tranquilas, no muy diferentes de la Vía Láctea. Alan M. Dressler y Douglas O. Richstone, trabajando en el Observatorio del Monte Palomar en California, hallaron que las velocidades estelares hacia el centro de esas galaxias aumentan más rápidamente de lo que cabría esperar, como si alojasen también grandes masas invisibles. Las distancias, incluso a esas galaxias próximas, resultan remotísimas y nos está vedado profundizar en el estudio de la ubicación y movimiento de la materia en la inmediata vecindad del centro, lo que sí es factible en el caso de la Vía Láctea.

Los científicos empeñados en conocer qué ocurre en el centro de nuestra galaxia deben solucionar algunos enojosos problemas. ¿Es la ra-

diofuente puntual Sgr A* un agujero negro? ¿Constituye acaso el agujero negro de gran masa asociado a IRS16 un conjunto de objetos muy calientes cercanos a Sgr A* que radian intensamente en el infrarrojo? ¿No estará ocurriendo algo muy distinto, de lo que sólo conocemos una enorme atracción gravitatoria, sin más señales externas?

La velocidad, pequeñísima, medida para Sgr A* abona la hipótesis de la presencia de un agujero negro, dotado de gran masa, en el centro de la galaxia. Si es cierta, ¿en qué consiste entonces IRS16? Los cinco componentes de este objeto, muy cercanos entre sí, parecen también tener las temperaturas típicas de estrellas muy calientes, pero radian con una intensidad millones de veces mayor que la solar, es decir, muy por encima de lo que cabría esperar de estrellas calientes normales. Además, el gas de alta velocidad en su proximidad podría haber sido emitido por uno de esos objetos. Estas propiedades recuerdan las estrellas de Wolf-Rayet, energéticas y raras.

Durante un eclipse del centro galáctico por la Luna, Becklin y sus colaboradores observaron el paso de las cinco componentes de IRS16 tras el disco de la Luna; advirtieron un rápido parpadeo, que denuncia un tamaño muy pequeño, propio de objetos únicos y no de cúmulos de estrellas. Se trata de objetos de un carácter nunca visto o de verdaderas estrellas de Wolf-Rayet. Mas, ¿por qué habrían de aparecer cinco estrellas de Wolf-Rayet en este lugar particular, donde existe relativamente poco gas para formar objetos de ese tenor? Tal vez se acumuló allí, en el pasado, una distribución apropiada de gas que caía hacia dentro; quizás esos objetos representan el resultado de choques estelares recientes; o quién sabe si, en el fondo, lo que pasa es que los astrónomos ignoran la naturaleza de esos objetos y han de estudiarlos mejor para interpretar la actividad que desarrolla esta región misteriosa e intensamente energética.

Recientes descubrimientos astronómicos y avanzadas técnicas para observar las emisiones de radio e infrarrojo han proporcionado sorprendente y minuciosa información sobre el centro galáctico: la materia allí existente, sus movimientos, densidades y temperaturas, la cantidad y clase de energía implicada y el número de estrellas y sus pautas de movimiento. Merced a todo ello, los astrónomos disponen ya de un esquema general del corazón de nuestra galaxia, amén de argumentos sólidos a favor de la existencia de un agujero negro de gran masa escondido en su seno. Pero queda todavía mucho por averiguar.

Para atar todos los cabos habrá que mejorar las técnicas astronómicas y disponer de instrumentos nuevos, algunos ya en construcción o en fase de proyecto. Habrá que esperar a las observaciones ópticas e infrarrojas precisas que facilitarán grandes telescopios, como el Keck de 10 metros que se está construyendo en Hawai y los cuatro telescopios de ocho metros que está preparando en Chile el Observatorio Austral Europeo. Nuevos y refinados interferómetros de infrarrojos ofrecerán alta resolución de la distribución de estrellas, polvo y gas caliente que hay en el centro de nuestra galaxia.

También la NASA y la Agencia Espacial Europea están empezando a construir o proyectando potentes instrumentos que se instalarán a grandes alturas o en el espacio. Recordemos el *Observatorio estratosférico de astronomía infrarroja* (una versión perfeccionada del *Observatorio astronómico Kuiper*) y telescopios infrarrojos en órbita, refrigerados por helio, que excederán con mucho las prestaciones de los anteriores detectores. Asistiremos este año al lanzamiento del GRO y del ROSAT, dos importantes instrumentos que medirán rayos X y gamma con gran sensibilidad y precisión.

En el medio siglo que ha transcurrido desde el pionero descubrimiento de Janski, el conocimiento del centro galáctico ha avanzado de forma notable. Cada nuevo descubrimiento, no obstante, ha traído consigo nuevos interrogantes que han despertado el interés y el deseo de instrumentos más potentes que se adentren en los misterios que celan el centro de nuestra galaxia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GALACTIC CENTER. American Institute of Physics Conference Proceedings 155. Dirigido por Donald C. Backer. American Institute of Physics, 1987.

PHYSICAL CONDITIONS, DYNAMICS, AND MASS DISTRIBUTION IN THE CENTER OF THE GALAXY. R. Genzel and C. H. Townes en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 25, págs. 377-423; 1987.

THE CENTER OF THE GALAXY. International Astronomical Union Symposium, n.º 136. Dirigido por Mark Morris. Kluwer Academic Publishers, 1989.

Reacción en cadena de la polimerasa

Un método de sorprendente sencillez para fabricar copias de fragmentos de ADN sin límite, concebido en circunstancias inverosímiles, durante un viaje a la luz de la luna a través de las montañas septentrionales de California

Kary B. Mullis

A veces, las buenas ideas surgen por casualidad. En mi caso ocurrió así: gracias a una rara combinación de coincidencias, ingenuidad y felices errores, me vino la inspiración un viernes de abril de 1983 mientras, al volante del coche, serpenteaba a la luz de la luna por una carretera de montaña del norte de California que atraviesa un bosque de secuoyas. Me di de bruces con un proceso que permite fabricar un número ilimitado de copias de cualquier gen: la reacción en cadena de la polimerasa (RCP).

A partir de una sola molécula de ADN, la RCP puede generar 100.000 millones de moléculas idénticas en una tarde. La reacción es muy sencilla, sólo necesita un tubo de ensayo, algunos reactivos y una fuente de calor. La muestra de ADN que se desea copiar no tiene forzosamente que ser pura; basta incluso la ínfima parte de una mezcla extraordinariamente compleja de materiales biológicos. El ADN puede proceder de una muestra de tejido de un hospital, de un cabello humano, de una gota de sangre coagulada en la escena de un crimen, de los tejidos de un cerebro momificado o de un mamut lanudo muerto hace 40.000 años y conservado en un glaciar.

Han pasado ya siete años desde aquella noche y la utilización de la RCP se ha propagado a todas las ciencias biológicas. Así lo atestiguan los más de 1000 artículos publicados en los que se describe su uso. Dado el impacto de la RCP en las investigaciones biológicas y su sencillez conceptual, el hecho de que a nadie se le ocurriese durante más de quince años, a pesar de que todos los elementos necesarios se hallaban en circulación, no deja de sorprender a mucha gente.

La reacción en cadena de la polimerasa simplifica la labor de los biólogos moleculares, pues con ella obtienen la cuantía de ADN que deseen. Podría parecer que purificar moléculas de ADN es tarea fácil. La verdad es que en la práctica cuesta conseguir una molécula bien definida de ADN natural de cualquier organismo, si dejamos de lado los virus más simples.

La dificultad reside en la propia naturaleza de la molécula. El ADN es una delicada cadena compuesta de cuatro tipos de desoxinucleótidos: desoxiadenilato (*A*), desoxitimidilato (*T*), desoxiguanilato (*G*) y desoxicitidilato (*C*). La secuencia de estas bases determina la información genética. Los ADN monocatenarios son raros; normalmente, parejas de cadenas con secuencias complementarias forman dobles hélices donde las *A* de una cadena se emparejan con las *T* de la otra, y las *G* con las *C* [*véase la figura 1*]. En el interior de las células, la hélice de ADN está a su vez enrollada y rodeada de diversas proteínas. Cuando los biólogos intentan aislar una cadena de ADN desnuda, ésta es tan larga y delgada que hasta los tratamientos más suaves la rompen aleatoriamente en múltiples pedazos. Por ello, si se extrae ADN de 1000 células idénticas, habrá 1000 copias de cualquiera de los genes de dicho ADN, pero cada copia se hallará en un fragmento de distinta longitud.

Durante años este problema dificultó el estudio de los genes. Hasta que en los años setenta se descubrieron las restrictasas, enzimas que cortan las cadenas de ADN por sitios específicos. Las restrictasas permiten cortar el ADN en fragmentos menores, más consistentes e identificables, merced a lo cual resulta más fácil aislar los fragmentos que portan el gen que nos interese.

A finales de los años setenta, los biólogos moleculares andaban muy ocupados estudiando ADN con restrictasas y otras moléculas: las sondas de oligonucleótidos. Llámase oligonucleótido una cadena breve de bases nucleotídicas específicamente ordenadas. Bajo condiciones experimentales adecuadas, un oligonucleótido se unirá de manera específica con una secuencia de nucleótidos complementaria. Por tanto, los oligonucleótidos marcados radiactivamente, sintetizados en el laboratorio, sirven de sonda para determinar si una muestra de ADN contiene una secuencia de nucleótidos específica (gen). En 1979, la empresa Cetus Corporation, de Emeryville, California, me contrató para sintetizar sondas de oligonucleótidos.

Hacia 1983, sin embargo, la síntesis de oligonucleótidos como forma de ganarse la vida empezó a perder su encanto, para mayor felicidad de quienes nos dedicábamos a eso. El laborioso pero muy singular procedi-

KARY B. MULLIS se autodefine como "un generalista con prejuicios químicos". Creador de la reacción en cadena de la polimerasa, ha inventado también un plástico que cambia de color tras la exposición a la luz ultravioleta. Se doctoró en bioquímica en 1972. Completó su formación investigadora en la facultad de medicina de la Universidad de Kansas y en la Universidad de California en San Francisco. Mullis ingresó después en la Cetus Corporation, donde descubrió la reacción en cadena de la polimerasa. Posee en La Jolla su propia oficina asesora en técnica de la RCP y química de ácidos nucleicos.

miento de síntesis manual de oligonucleótidos, al que nos habíamos cómodamente amoldado, dejaba paso a una menos encantadora pero fiable técnica automatizada. El avance fue considerable.

Gracias a esta pequeña revolución industrial, los químicos de nucleótidos nos encontramos, afortunadamente, con una gran cantidad de tiempo libre. Las máquinas de laboratorio, que nosotros cargábamos y vigilábamos, fabricaban más nucleótidos casi de los que cabían en el congelador, y, ciertamente, más de cuantos los biólogos moleculares —quienes parecían trabajar más lenta y cansinamente de lo que habíamos previsto— podían usar en sus experimentos. Por tanto, en mi laboratorio de la Cetus teníamos mucho tiempo para pensar y lucubrar.

Y me encontré a mí mismo entregado a la especulación sobre los oligonucleótidos.

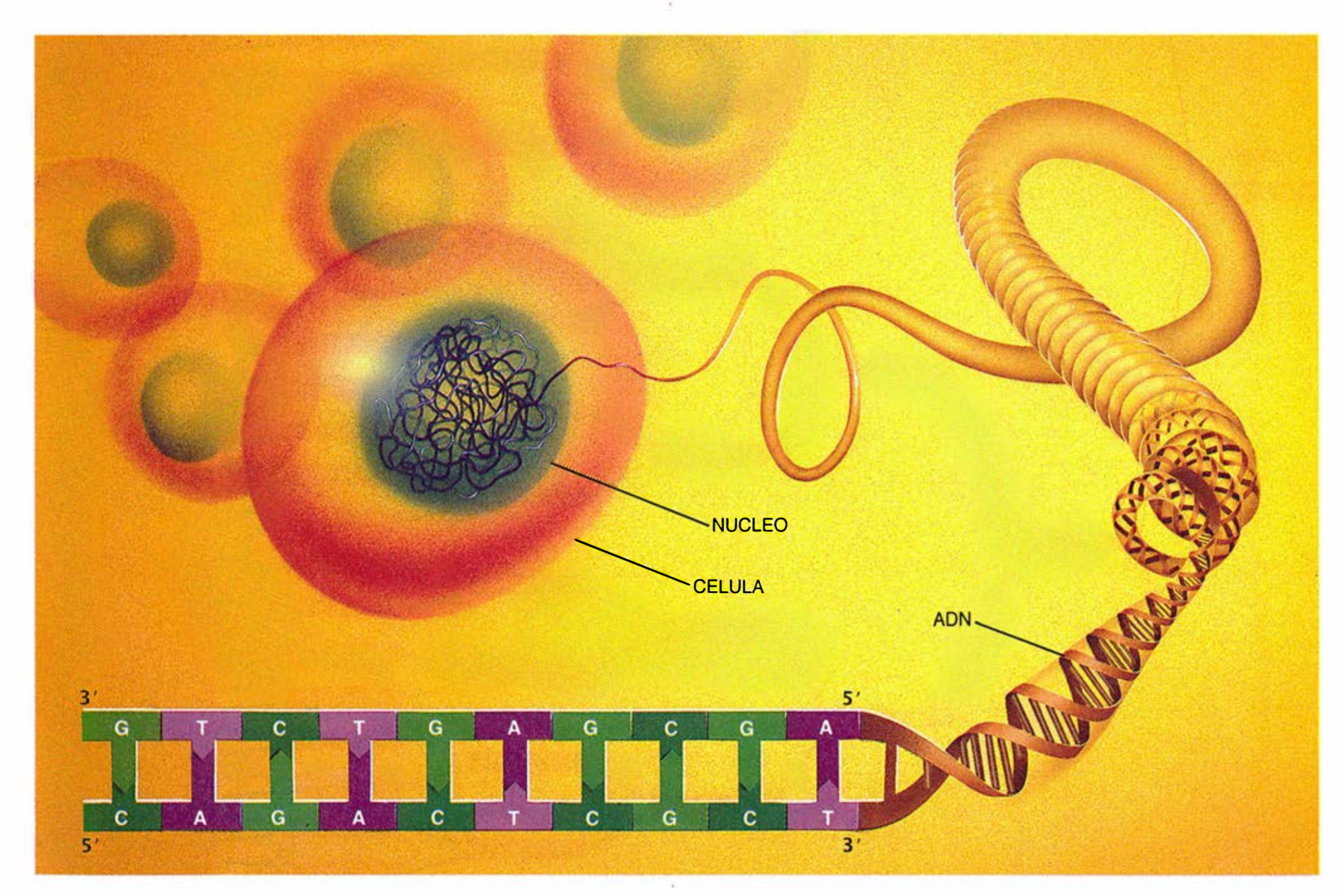
Sabía que una técnica que permitiese fácilmente identificar el nucleótido presente en una posición determinada de una molécula de ADN sería muy útil, sobre todo en los casos de gran complejidad del ADN (como en el ADN humano) y pequeña cantidad disponible. No veía por qué no se podía utilizar la enzima polimerasa de ADN en una variante del método de secuenciación con didesóxidos, y diseñé un cándido experimento para someter esa idea a comprobación.

Para entender qué me rondaba por la mente, conviene recordar ciertos aspectos del ADN. Los extremos de una cadena de ADN se denominan, por convención química, 3′ y 5′. En una doble hélice de ADN, las cadenas complementarias se dice que son antiparalelas, ya que el extremo 3′ de una de las cadenas se empareja con el 5′ de la otra, y viceversa.

En 1955, Arthur Kornberg y su grupo, de la Universidad de Stanford, descubrieron la polimerasa de ADN. Estas enzimas celulares desempeñan varias funciones, entre ellas, la reparación y replicación del ADN. Pueden elongar un breve oligonucleótido "cebador", añadiendo a su extremo 3′ más nucleótidos, pero sólo si el cebador se hibrida, o une, a una cadena complementaria, que recibe entonces el nombre de molde. La solución donde se lleva a cabo la reacción debe contener también nucleótidos trifosfatados, que son los ladrillos de esta construcción.

El nucleótido que coloca la polimerasa será complementario con la base que se aloja en la posición correspondiente de la cadena molde. Por ejemplo, si el nucleótido de la cadena molde es una *A*, la polimerasa añade una *T*; si es una *G*, añade una *C*. De esta manera, la polimerasa elonga el extremo 3′ del cebador en dirección al extremo 5′ hasta el final de la cadena molde [*véase la figura 3*]. En una doble hélice de ADN, cada una de las cadenas sirve de molde para la otra durante la replicación y reparación.

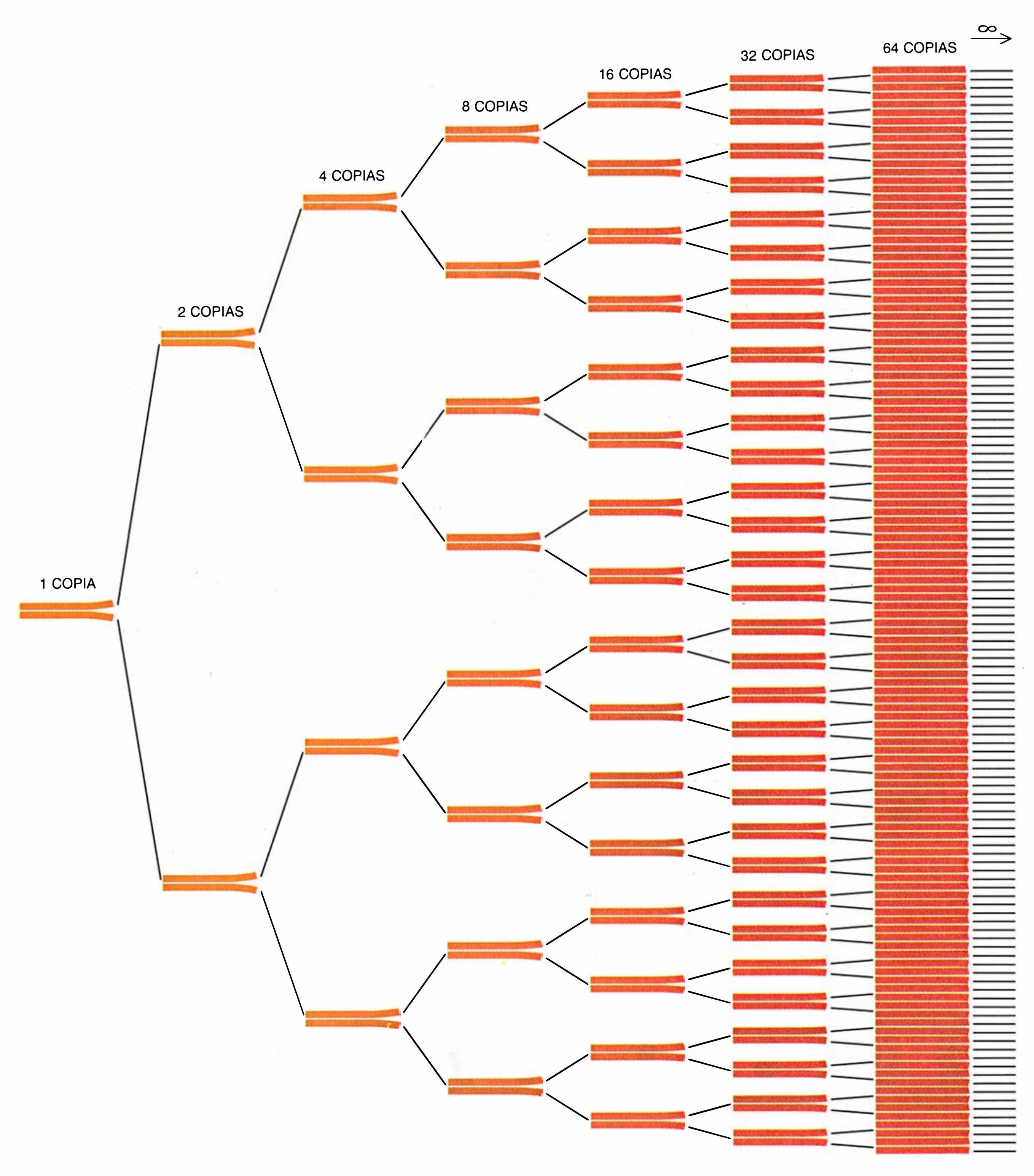
Vayamos ahora a la técnica de secuenciación con didesóxidos, también llamada de Sanger, en honor de uno de sus inventores, Frederick Sanger, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas Británico. Esta técnica utiliza una polimerasa de ADN, cadenas, moldes, cebadores, nucleótidos trifosfatados y didesóxidos trifosfatados especiales (ddNTP) para determinar secuencias de ADN. Igual que los nucleótidos normales, las polimerasas pueden incorporar los ddNTP en la nueva cadena que crece a partir del cebador; sin embargo, cuando esto ocurre, el ddNTP blo-



1. EL ADN consta de dos cadenas de nucleótidos: desoxiadenilatos (*A*), desoxitimidilatos (*T*), desoxiguanilatos (*G*) y desoxicitidilatos (*C*). La secuencia de nucleótidos en una de las cadenas es complementaria de la otra, esto es, las *A* emparejan con las *T*, y las *G* con las *C*; esta complementariedad mantiene unidas a las dos cadenas. Cada cadena posee un extremo 3′ y otro 5′. Por esa orientación opuesta se dice que son antiparalelas.

quea el extremo 3′; no cabe añadir ya más bases. La técnica de Sanger produce cadenas de longitud variable, cuyos tamaños dependen del momento en que se incorpore el ddNTP. Ordenando estos fragmentos por tamaños, y sabiendo qué ddNTP se ha incorporado, se determina la secuencia de bases de una cadena molde. Por ejemplo, si se ha incorporado en cierta posición didesoxiadenina (ddA), la base complementaria correspondiente en el molde será una *T*; la adición de una didesoxiguanina (ddG) implica la presencia de *C* en el molde.

En la versión modificada de esta técnica, yo pensaba utilizar sólo polimerasas, moldes, ddNTP y moléculas cebadoras; omitiría, por tanto, los nucleótidos trifosfatados normales. La elongación de los cebadores acabaría cuando se añadiese a la cadena una base de un ddNTP. Si conociera qué ddNTP se había agregado al cebador, sabría también la identidad de la base correspondiente de la cadena molde. Podría así deducir la identidad



2. REACCION EN CADENA DE LA POLIMERASA, técnica sencilla con la que se puede copiar un fragmento de ADN en el laboratorio, empleando reactivos asequibles. El número de copias aumenta exponencialmente; en unas pocas horas se pueden fabricar más de 100.000 millones de ellas.

de la base de una cadena molde adyacente al sitio donde se uniese el cebador.

En ese momento no caí en la cuenta de que había poderosas razones para que mi idea fracasase. El problema era que los oligonucleótidos, a veces, hibridan con otras secuencias de ADN, que no son las que nos interesan. Estos inevitables emparejamientos habrían introducido bastante ambigüedad en mis resultados. Incluso con las manos más diestras en el arte de la hibridación, es imposible conseguir que se unan oligonucleótidos al ADN humano con suficiente especificidad como para obtener un resultado al menos mínimamente significativo.

Por culpa de ese inconveniente, los investigadores han recurrido a procedimientos tortuosos para escrutar el ADN humano. Por ejemplo, se emplean restrictasas para cortar la muestra de ADN en varios fragmentos, que se separan por electroforesis. Se consigue con ello "purificar" en cierta forma los fragmentos diana del resto del ADN, antes de proceder a la hibridación con la sonda de oligonucleótidos. Este procedimiento reduce lo suficiente las hibridaciones erróneas como para obtener resultados significativos, aunque mínimos. Se trata, además, de un proceso bastante largo y no sirve para trabajar con muestras de ADN degradado o desnaturalizado.

Otra técnica onerosamente larga para el análisis rutinario del ADN se vale de la clonación. En un plásmido, un pequeño anillo de ADN, podemos clonar o copiar la secuencia de ADN humano que nos importe. El recurso a las bacterias nos ofrece copias de dicho plásmido, y de la secuencia deseada. La información sobre la secuencia se puede obtener utilizando las técnicas de hibridación con oligonucleótidos y de secuenciación con didesóxidos. A comienzos de la década de los ochenta, la mayor parte de la información sobre secuencias de ADN humano procedía de la clonación y secuenciación del ADN con esta última técnica.

En el protocolo de mi cándido experimento, se daba por supuesto que la utilización de oligonucleótidos para detectar secuencias específicas de ADN humano con una simple hibridación hacía innecesario recurrir a la clonación o a cualquier otra técnica. En defensa de mi erróneo planteamiento, debo decir que uno de los grupos de Cetus que trabajaban en el piso de abajo, dirigido por Henry A. Erlich, intentaba otro método basado en la hibridación de un simple oligonucleótido a un ADN humano diana. Nadie se carcajeaba de Henry, y a todos nos pagaban regularmente. De hecho nos pagaban lo suficiente como para que alguno de nosotros pensásemos, quizás insolentemente, que estábamos poco menos que en la frontera de la tecnología del ADN.

Un viernes por la noche, a finales de primavera, me dirigía a Mendocino Country con una amiga química. Ella dormía. No iba casi nadie por la autopista a aquellas horas. Me gustaba conducir de noche; los fines de semana salía hacia el norte, a mi cabaña, sentado tranquilamente durante tres horas en mi coche, las manos ocupadas, la mente libre. Esa noche, concretamente, pensaba en mi experimento de secuenciación de ADN.

Mis planes eran sencillos. Comenzaría por separar un ADN diana en cadenas sencillas, calentándolo. Lo hibridaría después con un oligonucleótido cuya secuencia fuese complementaria con algún fragmento de una cadena. Colocaría porciones de esta mezcla de ADN en cuatro tubos distintos. Cada tubo contendría los cuatro tipos de ddNTP, pero en cada uno de ellos habría un ddNTP distinto marcado con radiactividad. Añadiría, a continuación, polimerasa de ADN, que elongaría en un solo ddNTP los oligonucleótidos que hubiesen hibridado en cada tubo. Mediante electroforesis podría separar los oligonucleótidos resultantes de los ddNTP que no hubiesen hibridado. Identificando qué ddNTP marcado radiactivamente se había incorporado en el oligonucleótido, podría determinar la correspondiente base complementaria de la cadena diana. Sin más.

Cerca de Cloverdale, donde se abandona la autopista para tomar una carretera que serpentea costa arriba, decidí que sería mejor si, en vez de un solo oligonucleótido, usaba dos. Los dos cebadores rodearían al par de bases que esperaba identificar. Utilizando oligonucleótidos de distinto tamaño, podría distinguirlos. Si, además, cada oligonucleótido era específico del ADN diana de una cadena, obtendría información sobre las dos cadenas complementarias. El experimento contaría de esta manera con un control interno, sin que ello supusiese ninguna molestia adicional [*véase la figura 4*].

Aunque en ese momento no me di cuenta, con los dos oligonucleótidos en mi cabeza, con sus extremos 3′ apuntándose uno a otro, en cadenas opuestas del gen diana, estaba a punto de descubrir la reacción en cadena de la polimerasa. De lo que sí estuve a punto, no obstante, fue de salirme de la carretera y despeñarme.

La noche era húmeda y se percibía el olor de los castaños de indias florecidos. Las blancas inflorescencias se interponían ante mí, deslumbradas por los faros del coche. Iba yo pensando en los nuevos estanques que estaba construyendo en mi finca y lucubrando en los fallos posibles del experimento de secuenciación.

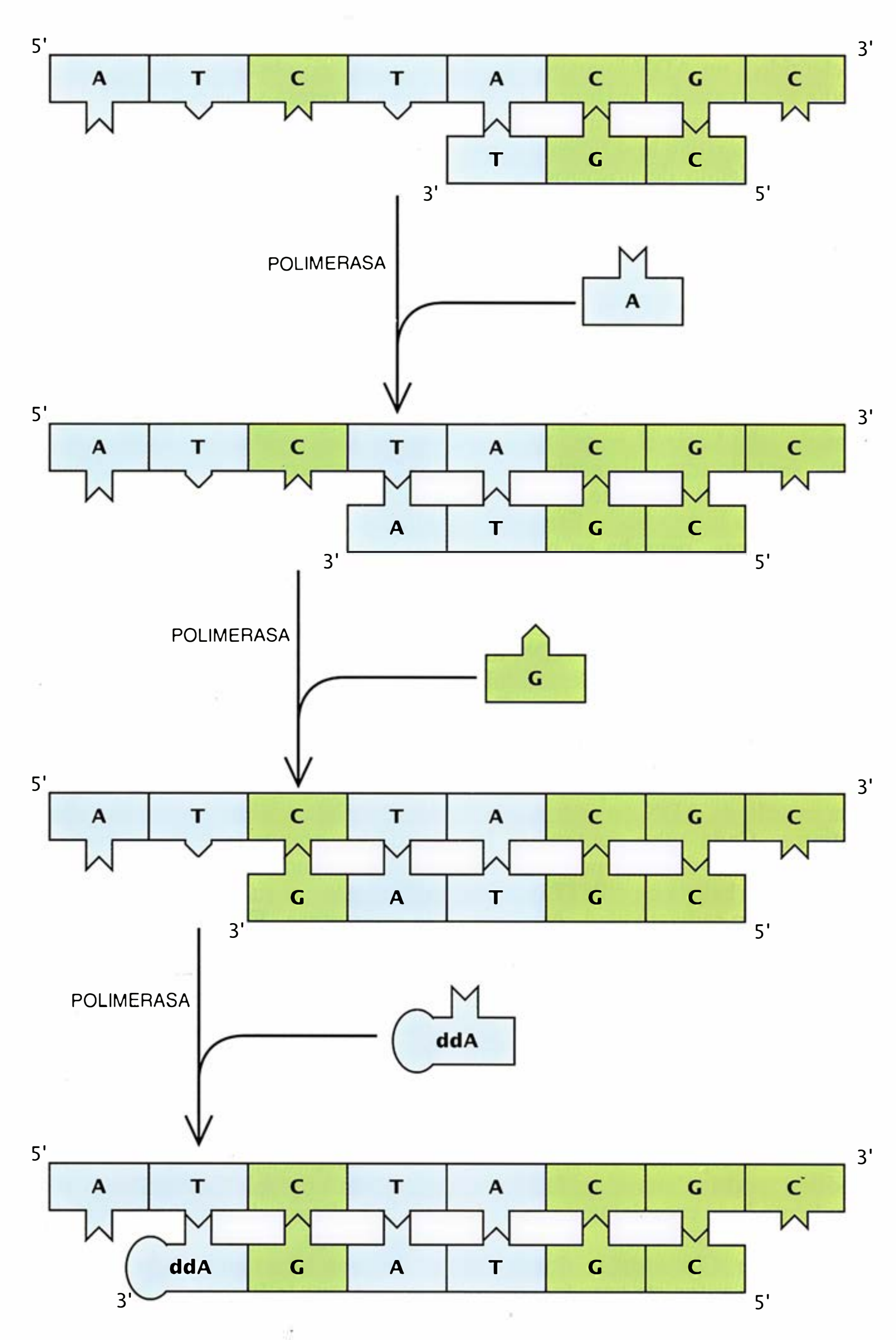
De mi etapa postdoctoral en el laboratorio de Wolfgang Sadee, en la Universidad de California en San Francisco, donde John Maybaum utilizaba los nucleótidos para ensayos clínicos, recordé que mis muestras de ADN podían contener trazas de nucleótidos trifosfatados. Pensé que la interpretación del gel se complicaría, si los nucleótidos extraviados que fuesen con la muestra se incorporasen en el extremo 3′ del cebador, antes de la prevista adición de los ddNTP marcados.

Se me ocurrió destruir los nucleótidos trifosfato libres con fosfatasa alcalina. Esta enzima bacteriana eliminaría los grupos fosfato reactivos de cualquier nucleótido trifosfatado, suprimiendo así su reactividad frente a la polimerasa. Ello me obligaría, sin embargo, a eliminar la fosfatasa de la muestra, so pena de destruir también la ddNTP, cuando los añadiese. Normalmente, las enzimas indeseables se pueden inactivar calentándolas y alterando así su configuración funcional. Suponía, sin embargo, que la fosfatasa alcalina bacteriana podía volver a adoptar, por sí sola, su configuración original. Rechacé, por tanto, la fosfatasa alcalina como solución al problema.

Pero andaba equivocado. Más tarde supe que la fosfatasa alcalina puede desnaturalizarse irreversiblemente por calor, siempre que no haya cinc en la solución. Fue, sin embargo, un error providencial: si hubiera sabido más, habría dejado de buscar opciones alternativas.

A cada kilómetro, surgía otra posible solución, que era inmediatamente rechazada. Cuando empecé el descenso hacia el valle Anderson, me vino una idea que apelaba a mi sentido de la estética y la economía: utilizaría la misma enzima, la polimerasa de ADN, dos veces, primero para eliminar los nucleótidos trifosfatados extraños de la muestra, y, luego, para incorporar los ddNTP marcados.

Con suficientes nucleótidos en la muestra para bloquear el experimento, bastarían también, pensé, para que la polimerasa de ADN actuase



3. POLIMERASA DE ADN, enzima que elonga una cadena corta de ADN, denominada oligonucleótido cebador, si ésta se une a una cadena "molde" de ADN más larga. La polimerasa lleva a cabo este proceso añadiendo los nucleótidos complementarios al extremo 3′ del cebador unido. Si se incorpora un didesoxinucleótido trifosfatado (ddNTP), como la desoxiadenina (ddA), se interrumpe la elongación, ya que en el extremo 3′ de la ddA no se puede acoplar ningún otro nucleótido.

sobre ellos. Sometiendo la muestra a una serie de reacciones preliminares, con cebadores de oligonucleótidos y polimerasa, pero sin ddNTP, eliminaría fácilmente los nucleótidos libres de la muestra, incorporándolos a los propios oligonucleótidos en extensión. Elevando entonces la temperatura, podría separar estos nuevos oligonucleótidos, más largos, del ADN diana. En realidad, los oligonucleótidos elongados permanecerían en la muestra; pero, como habría muchos más cebadores originales sin elongar que alargados, los ADN diana acabarían por hibridarse con los cebadores originales, cuando se enfriase la muestra. A continuación, añadiría ddNTP y más polimerasa, para acometer el experimento de secuenciación.

Seguían acosándome algunas dudas. ¿Entorpecerían los oligonucleótidos elongados por la reacción preliminar las siguientes reacciones? ¿Qué ocurriría si la elongación fuese de muchas bases, y no de sólo una o dos? ¿Qué pasaría si la elongación hubiese creado una secuencia que incluyese un fragmento complementario a la otra molécula cebadora? Eso causaría problemas...

No. ¡Todo lo contrario! De repente, me sacudió la evidencia: las cadenas del ADN diana y los oligonucleótidos elongados tendrían la misma secuencia de bases. ¡En efecto, la reacción preliminar habría doblado el número de ADN dianas presentes en la muestra!

De pronto, al menos para mí, la fragancia de los castaños de indias se diluyó exponencialmente.

En otras circunstancias no me hubiese dado cuenta con tanta rapidez de la importancia de esta duplicación. La misma idea de repetir un procedimiento una y otra vez me habría parecido exasperante y monótona. Pero, había pasado muchas horas escribiendo programas de ordenador, y estaba familiarizado con los bucles reiterativos —procedimientos en los que una operación matemática se aplica repetidamente a los productos de las operaciones previas. Esta experiencia me había enseñado el poder de los procesos reiterativos de crecimiento exponencial. El procedimiento de replicación de ADN que acababa de imaginar se ajustaba a un proceso de ese tipo.

Emocionado, empecé a calcular potencias de dos: dos, cuatro, ocho, 16, 32... Recordaba vagamente que dos elevado a la décima potencia era alrededor de 1000, y que, por tanto, dos elevado a veinte se aproximaba al millón. Paré el coche en un mirador desde el que se divisaba el valle Anderson. Saqué de la guantera lápiz y papel —necesitaba comprobar mis cálculos, Jennifer, mi adormilada pasajera, protestó débilmente por el retraso y la luz. Le grité que había descubierto algo fantástico; ajena a mis cavilaciones, se volvió a dormir. Confirmé que dos a la veinte era en efecto alrededor de un millón, y seguí adelante.

Aproximadamente un kilómetro más abajo, se me ocurrió algo relacionado con los productos de la reacción. Tras unas pocas rondas de elongar cebadores, disociarlos, rehibridar nuevos cebadores y elongarlos nuevamente, la longitud de las cadenas del ADN que se acumula de manera exponencial quedaría fijada, ya que sus extremos estarían perfectamente definidos por los extremos 5′ de los cebadores. Podría replicar fragmentos mayores de la muestra original de ADN si diseñaba cebadores que hibridasen en sitios más alejados entre

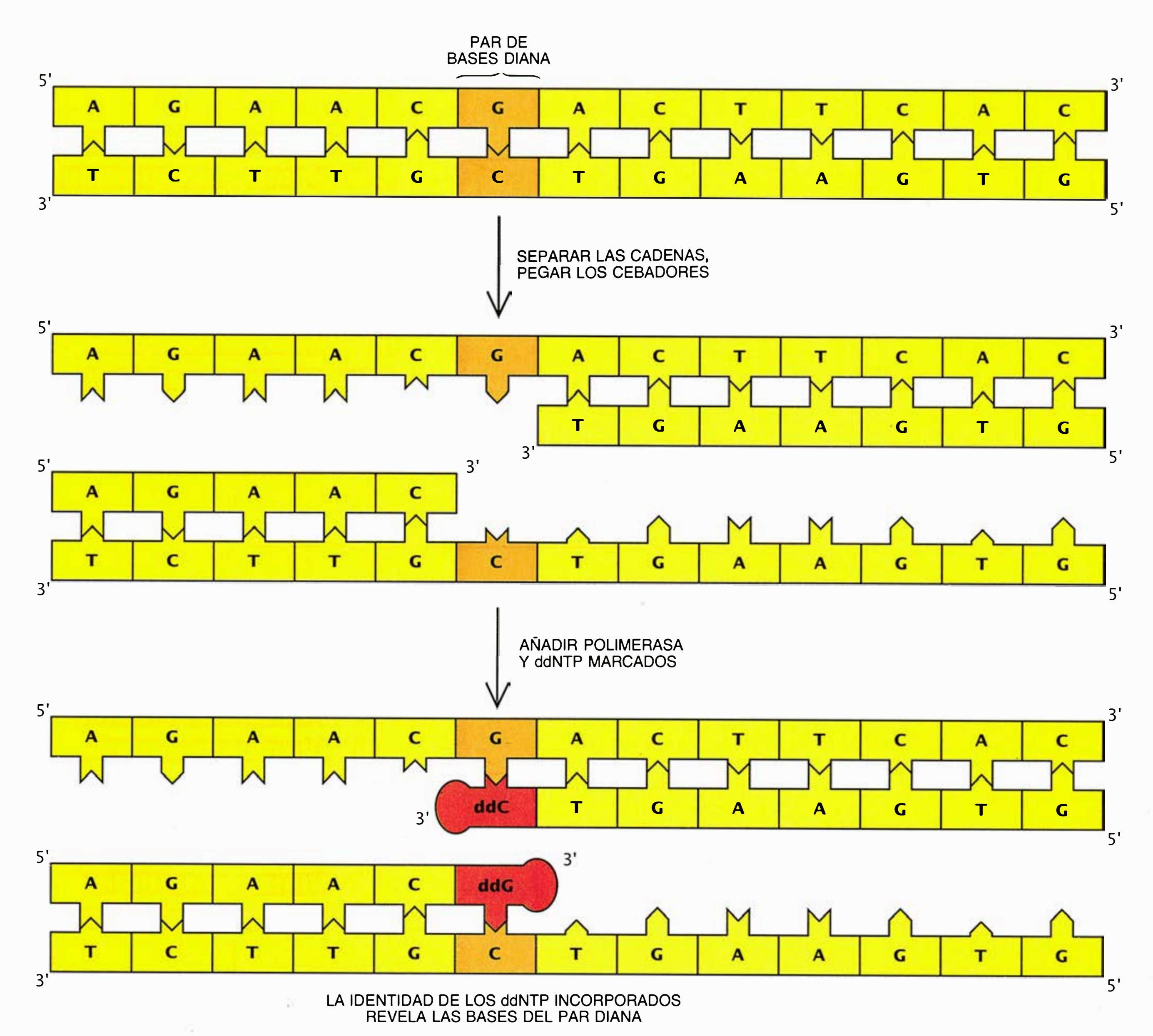
sí. Los fragmentos serían siempre entidades discretas de una longitud específica.

Paré de nuevo el coche y comencé a dibujar líneas de moléculas de ADN que hibridaban y se alargaban, y que, una vez disociadas como producto del primer ciclo, se convertían en moldes de la reacción siguiente... Jennifer protestó de nuevo por interrumpirle el sueño. "No te lo vas a creer", exclamé. "Asombroso".

No quiso despertarse. Seguí hasta la cabaña sin más paradas. En la hondonada del valle comienzan las secuoyas y la tierra por antonomasia de los zoquetes. Mi descubrimiento me hizo sentir como si estuviera a punto de quebrantar esa vieja tradición del valle. Tardé en dormirme aquella noche, con las bombas desoxirribonucleares estallando en mi cabeza.

Por la mañana, me sentía todavía tan cansado que imaginé que alguien, en algún lugar, se le habría ocurrido antes la misma idea. Miles de investigadores habían, por diversas razones, utilizado la polimerasa para alargar oligonucleótidos; seguramente alguno habría considerado la posibilidad de una reacción en cadena de la polimerasa. Pero si hubiese funcionado, sin duda me habría enterado, ya que se utilizaría constantemente para amplificar, o multiplicar, fragmentos de ADN.

De vuelta al Cetus, el lunes, pedí a uno de los bibliotecarios, George McGregor, que me hiciera un vaciado bibliográfico sobre polimerasas de ADN. No encontró nada de interés sobre multiplicación ("amplificación"). Durante las siguientes semanas expliqué mi idea a todo el que me quiso escuchar. Nadie había oído nada sobre eso; ni esgrimían ninguna razón de peso para que no funcionase. A pesar de ello, nadie se mostró muy entusiasmado con la novedad. La gente solía pensar que mis ideas sobre ADN eran poco fiables, y a veces, después de unos días, yo también



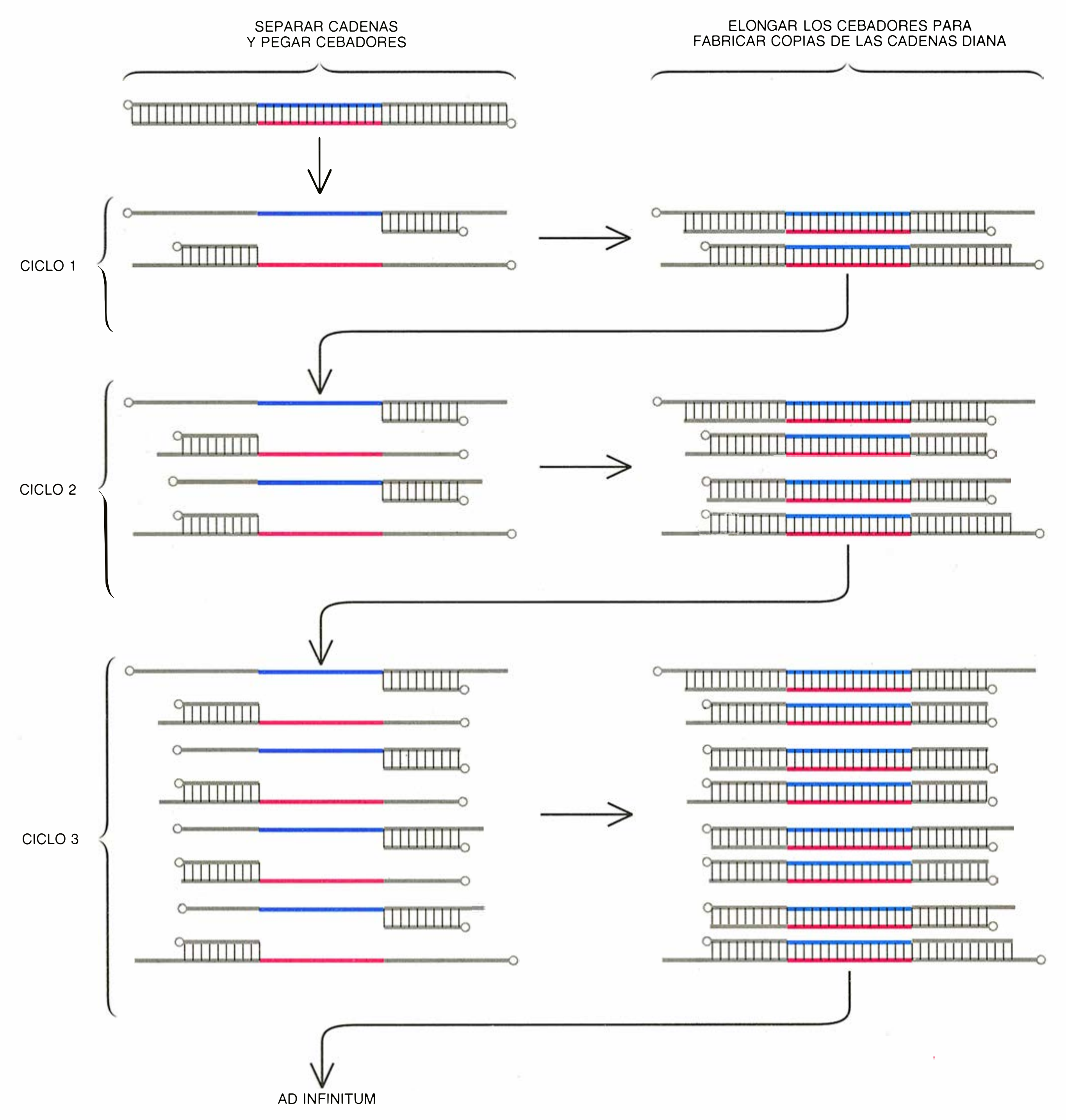
4. PARA DETERMINAR LA IDENTIDAD de un par de bases en un segmento de ADN, el autor confiaba en aplicar una variante de una técnica de secuenciación basada en la utilización de didesoxinucleótidos. Se añadirían dos cebadores a las cadenas opuestas del ADN, en sitios contiguos al par de bases diana. Se agregaría luego a la mezcla polimerasa de ADN y didesoxinucleótidos trifosfatados (ddNTP), con lo que los respectivos cebadores se elongarían sólo en una base. La identidad de la base del ddNTP incorporado revelaría la de la diana complementaria. La técnica funciona con un solo cebador; con dos se puede obtener un control interno de los resultados. Durante la planificación del ensayo, el autor descubrió la RCP.

reconocía su inconsistencia. Pero esta vez la cosa era muy distinta.

Hace años, antes de que se pusiese de moda la biotecnología, nuestro edificio de la empresa Cetus pertenecía a la Shell Development Company. El espacio que ahora ocupa nuestro laboratorio, cuyas ventanas traseras se asoman a las colinas de Berkeley, había visto nacer a la famosa 'Tira anti-insectos''. No me pasaba inadvertido que la RCP podía, algún día, llegar tan lejos como su invento hermano, esa pieza de plástico amarillo y característico perfume.

Pasaron meses mientras preparaba mi primer experimento para comprobar si la RCP funcionaba. Debía optimizar el ensayo y decidir qué solución tamponada usar, qué concentraciones relativas y absolutas de los reactivos habría que emplear, cuánto calentar y enfriar las muestras, cuánto tiempo dejarlas en incubación, etc. Algo me orientaron los primeros artículos de Kornberg sobre la polimerasa de ADN. Para realizar el experimento, seleccioné un fragmento diana de 25 pares de bases, procedente de un plásmido, y dos oligonucleótidos de 11 y 13 pares de bases como cebadores.

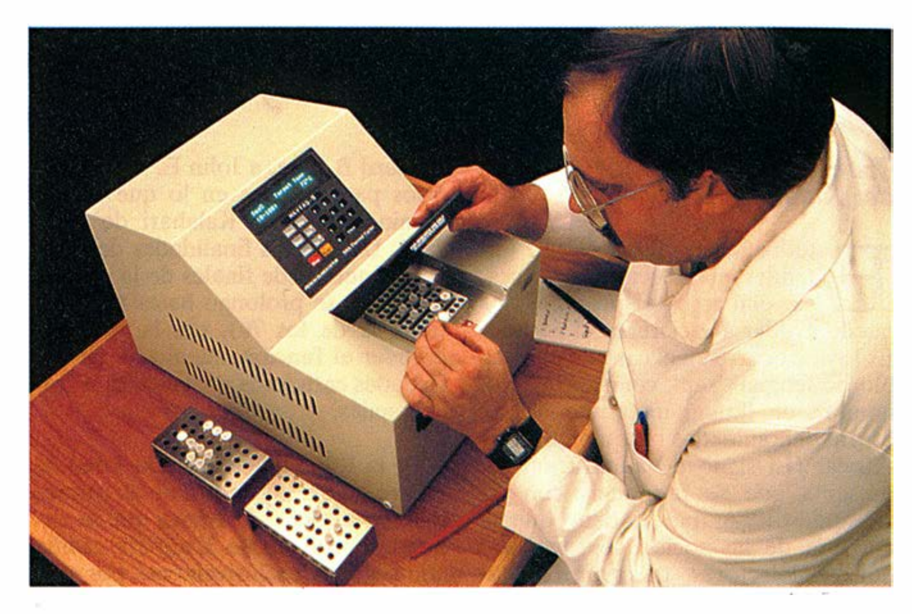
Cuando estuvo todo listo, acometí mi tipo favorito de experimento: el que sólo necesita un tubo de ensayo y en el que la respuesta es positiva o negativa. ¿Multiplicaría la RCP la secuencia de ADN seleccionada? La respuesta fue sí.



5. REACCION EN CADENA DE LA POLIMERASA, un proceso cíclico; en cada ciclo se dobla el número de ADN dianas. Las cadenas de cada ADN diana bicatenario se separan con calor; a continuación, se enfrían para permitir que los cebadores se puedan unir a ellas. Luego, las polimerasas de ADN elongan los cebadores, añadiéndoles nucleótidos. De esta manera, se van produciendo duplicados de las cadenas de ADN diana originales.

Cuando, ya a última hora de la tarde, me marchaba del laboratorio, vi que Albert Halluin, el experto en patentes de la Cetus, estaba aún en su despacho. Le dije que había inventado algo, y le hablé de la RCP. Al fue la primera persona, del casi centenar a quienes se lo había contado, que dio crédito a mi relato. Quiso ver enseguida el autorradiograma con los resultados del experimento; aún estaba mojado.

Los experimentos de un solo tubo de ensayo no suelen provocar muchas emociones. En todo caso, Al no parecía escéptico. Después de todo, la razón de ser de los expertos en patentes eran los inventos. Cuando, en su despacho, le explicaba el proceso, lo encontró coherente. Ahora, en el laboratorio, dejaba traslucir un punto de excitación, y sugirió que me concentrase en el experimento y escribiese un protocolo de patente. Al irse, me felicitó.



6. MAQUINA donde se realiza la reacción en cadena de la polimerasa, en el momento en que se introducen unas muestras de ADN. Estos aparatos son imprescindibles en cualquier laboratorio.

Durante los meses siguientes continué estudiando y refinando la RCP, con la ayuda de Fred A. Faloona, un joven matemático que conocí a través de mi hija. Fred me ayudó en el primer experimento de la RCP, realizando los ciclos de la mezcla de ADN; era su primer experimento bioquímico, y lo celebramos la noche del éxito con unas cervezas.

Con el paso de las semanas confirmamos que la RCP funcionaba con fragmentos cada vez mayores de ADN plasmídico. Por último, obtuvimos un ADN humano del laboratorio de Henry Erlich, y demostramos la multiplicación de un fragmento de un gen de copia única.

Se han superado ya las limitaciones y fallos iniciales de la RCP. Son varios los protocolos, con ligeras variantes, actualmente en uso. Suelo aconsejar que las muestras de ADN se ciclen entre unos 98° C, justo antes del punto de ebullición, y 60° C. Estos ciclos pueden ser de uno o dos minutos. Durante cada ciclo, el número de moléculas de ADN diana se duplica. Los cebadores constan de unas 20 o 30 bases de largo. Entre los refinamientos principales del proceso destacaría el uso de una polimerasa de ADN especial, purificada de la bacteria *Thermus aquaticus*, que vive en fuentes termales. La polimerasa que empleábamos en los primeros ensayos se destruía fácilmente con el calor, y nos veíamos obligados a añadir más después de cada ciclo de la reacción. La polimerasa de ADN de *Thermus aquaticus*, sin embargo, es estable y activa a temperaturas altas; sólo hay que añadirla al principio de la reacción. Esta polimerasa termoestable se produce ahora sin problemas por ingeniería genética.

La amplificación, virtualmente ilimitada, del ADN mediante la RCP era algo inaudito para ser aceptado de buenas a primeras. Nadie estaba preparado para un proceso que suministrase todo el ADN que uno pudiese desear. A Fred y a mí, la reacción nos parecía poco menos que obvia, ya que era nuestro juguete. La mayoría de la gente, sin embargo, tardó algun tiempo en familiarizarse.

En la primavera de 1984, mientras trabajaba en la patente, presenté un póster que describía la RCP en la reunión científica anual de la Cetus. Estas conferencias tenían su encanto, porque la empresa contaba con asesores científicos de primera línea y ardía yo en ganas de hablarles de mi invento.

A nadie, sin embargo, parecía interesarle mi póster. Mi ansiedad fue en aumento. La gente le echaba un vistazo y seguía paseando. Al fin, vi que Joshua Lederberg, presidente de la Universidad Rockefeller, se aproximaba, y lo cacé para que se fijara en mis resultados. Josh observó el póster con cierta detención y, finalmente, volvió su imponente testa, laureada con el Nobel, la cabeza que en 1946 llegó a la conclusión de que las bacterias podían tener "relaciones" sexuales. "¿Esto funciona?" Le pareció curioso.

Contento, le confirmé que sí, y charlamos durante bastante tiempo. En un momento dado, mencionó que unos 20 años antes, después de que Kornberg hubiese descubierto la polimerasa de ADN, habían considerado la posibilidad de emplear la enzima para fabricar grandes cantidades de ADN. Pero no acertaron a imaginarse cómo. Le recordé que en aquella época no era fácil disponer de oligonucleótidos, y que apenas había información sobre secuencias de ADN.

Y se volvió hacia mi póster con una expresión significativa. Creo que Josh, tras comprobar la increíble simpleza de la RCP, fue quizá la primera persona que pensó lo que se convertiría en la reacción inmediata de todos los biólogos moleculares e "ingenieros" del ADN: "¿Por qué no se me habría ocurrido?" Y nadie sabe la razón. Yo tampoco. Simplemente, me encontré con ella una noche rezumada con la fragancia de los castaños en flor.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPECIFIC SYNTHESIS OF DNA IN VITRO VIA A POLYMERASE-CATALYZED CHAIN REACTION. Kary B. Mullis y Fred A. Faloona en *Methods in Enzymology*, vol. 155, parte F, págs. 335-350; 1987.

AMPLIFICATION OF HUMAN MINISATELLITES BY THE POLYMERASE CHAIN REACTION: TOWARDS DNA FINGERPRINTING OF SINGLE CELLS. Alec J. Jeffreys, Victoria Wilson, Rita Neumann y John Keyte en *Nucleic Acids Research*, vol. 16, págs. 10.953-10.971; 1988.

DNA SEQUENCING WITH THERMUS AQUATICUS DNA POLYMERASE AND DIRECT SEQUENCING OF POLYMERASE CHAIN REACTION-AMPLIFIED DNA. M. A. Innis, K. B. Myambo, D. H. Gelfand y Mary Ann D. Brow en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 85, n.° 24, págs. 9.436-9.440; diciembre de 1988.

THE POLYMERASE CHAIN REACTION. T. J. White, Norman Arnheim y H. A. Erlich en *Trends in Genetics*, vol. 5, n.° 6, págs. 185-188; junio de 1989.

Ciencia y sociedad

Transformación de los !Kung del Kalahari

Estudiamos la historia para entender el presente. A veces, sin embargo, el presente nos puede ayudar a esclarecer el pasado. Es lo que ocurre en el caso de un pueblo de lengua "san" conocido por el nombre de !kung, un grupo de los otrora denominados bosquimanos del Africa. (El signo de admiración representa que se pronuncia con un chasquido.) ¿A qué se debe que la mayoría de las sociedades de cazadores-recolectores desaparezcan al entrar en contacto con otras que tienen animales y plantas domesticados?

Esta rápida desaparición resulta desconcertante. Al fin y al cabo, la del cazar animales y recoger frutos silvestres fue una estrategia lo bastante eficaz como para asegurarles la supervivencia a los seres humanos anatómicamente modernos desde su aparición hace más de 50.000 años hasta algún tiempo después de que, hace unos 10.000 años, comenzara la domesticación de animales y plantas. La ciencia convencional sugiere que muchas sociedades tradicionales, reconociendo las ventajas que el pastoreo y la agricultura suponían para la nutrición, abandonaban sencillamente sus viejas prácticas en cuanto adquirían conocimiento de las nuevas estrategias de subsistencia. Sin embargo, cierto número de observaciones indican que, en muchos casos, explicar por la insatisfacción el abandono del régimen de caza y recolección es manifiestamente erróneo.

¿Qué es, entonces, lo que explica el declinar de las sociedades cazadoras-recolectoras? A ciencia cierta nadie puede decirlo, pero los estudios que se han venido haciendo sobre los recientes cambios en la manera de vivir de los !kung proporcionan asomos de una respuesta que tal vez sea ampliamente aplicable. Hoy día los muchachos !kung no aprenden ya a cazar, y algunos de los códigos de conducta que dieron cohesión a su sociedad se están erosionando.

Por fortuna, antes de iniciarse su espectacular cambio se compiló una descripción bastante detallada de la cultura tradicional de los !kung. Lo que de ella sabemos se debe a los meritorios trabajos de muchos investigadores, entre los que hay que contar a la independiente antropóloga Lorna Marshall, que empezó a estudiar el grupo en 1951, a Irven De-Vore, a Richard B. Lee, a John E. Yellen y a otros participantes en lo que se denominó Proyecto Kalahari de Harvard. Una de las finalidades del proyecto (que desde finales de la década de los 60 se prolongó hasta muy entrada la de los 70), era la de comprender el funcionamiento de las sociedades cazadoras y recolectoras tradicionales.

De la Edad de Piedra a la Edad de Hierro. Con anterioridad al primer milenio a. J. C., el Africa que se extiende al sur del río Zambeze estaba aún poblada exclusivamente por grupos cazadores-recolectores cuyos individuos debían de ser bajos de estatura, no muy negros de piel y hablantes de las lenguas llamadas "khoisan" (todas las cuales, como las del grupo "san", incluyen una especie de chasquidos). Parece ser que, en un pasado todavía más remoto, los diversos grupos habrían compartido una lengua y una cultura comunes y que, luego, al irse dispersando, se adaptarían a las condiciones específicas de los países en que se fueron asentando.

Los grupos formaban los que los arqueólogos llamarían después "pueblos de la Edad de Piedra". Las hojas de sus cuchillos y raspadores eran de piedra, tallada a golpes para formar los distintos instrumentos. Hasta ahora no se han encontrado allí indicios propios de los pueblos de la Edad de Hierro: restos de cabras, ovejas y vacas domesticadas; del cultivo de granos como el mijo y el sorgo; de cerámica; ni de la fundición y forja del hierro y del cobre.

Los primeros influjos de la Edad de Hierro tuvieron lugar en el sur de Africa al iniciarse el primer milenio a. J. C., cuando, según lo atestiguan los restos arqueológicos, se introdujeron allí algunas mercancías y animales domésticos. A tales artículos no tardaron en seguirlos los mismos pobladores que vivían ya en la Edad de Hierro. Los recién llegados provinientes de las zonas norteñas hablaban en su mayoría lenguas bantúes y, comparados con los cazadores-recolectores, eran de talla más elevada y de tez más oscura. Directa o indirectamente, se irían viendo expuestos a la irrupción de los nuevos colonizadores y sus tecnologías, y, posteriormente, a oleadas de invasores europeos: comenzando por los holandeses y los portugueses en los siglos XV y XVI y siguiendo más tarde por los ingleses y los alemanes.

Bastantes de los grupos de cazadores y recolectores fueron exterminados por los intrusos. En la mayoría de los demás casos, los grupos se disolvieron fusionándose a menudo con sus nuevos vecinos por medio de matrimonios mixtos.

En ciertos casos, los cazadores-recolectores fueron capaces de conservar su propia identidad genética y cultural. Algunos de ellos, cambiando muchas prácticas, llegaron a transformarlas en nuevas culturas. En cambio, en el desierto sudafricano de Karroo y en el de Kalahari algo más al norte, unas pocas sociedades de cazadores y recolectores –entre ellas la de los !kung– no sólo se mantuvieron intactas sino que, al parecer, permanecieron también aferradas a sus antiguas costumbres.

Todavía en 1968, la mayoría de los hombres y mujeres !kung de la región botswaniana de Dobe seguían vistiéndose con pieles de animales y subsistían de la caza y la recolección. Verdad es que hacía ya mucho que el hierro había reemplazado a la piedra en el instrumental y que los recipientes de plástico y de diversos metales habían suplantado a sus equivalencias de cerámica. Sin embargo, los hombres cazaban aún con arcos y con flechas envenenadas, y las mujeres seguían saliendo diariamente a escarbar el suelo con palos en busca de raíces comestibles.

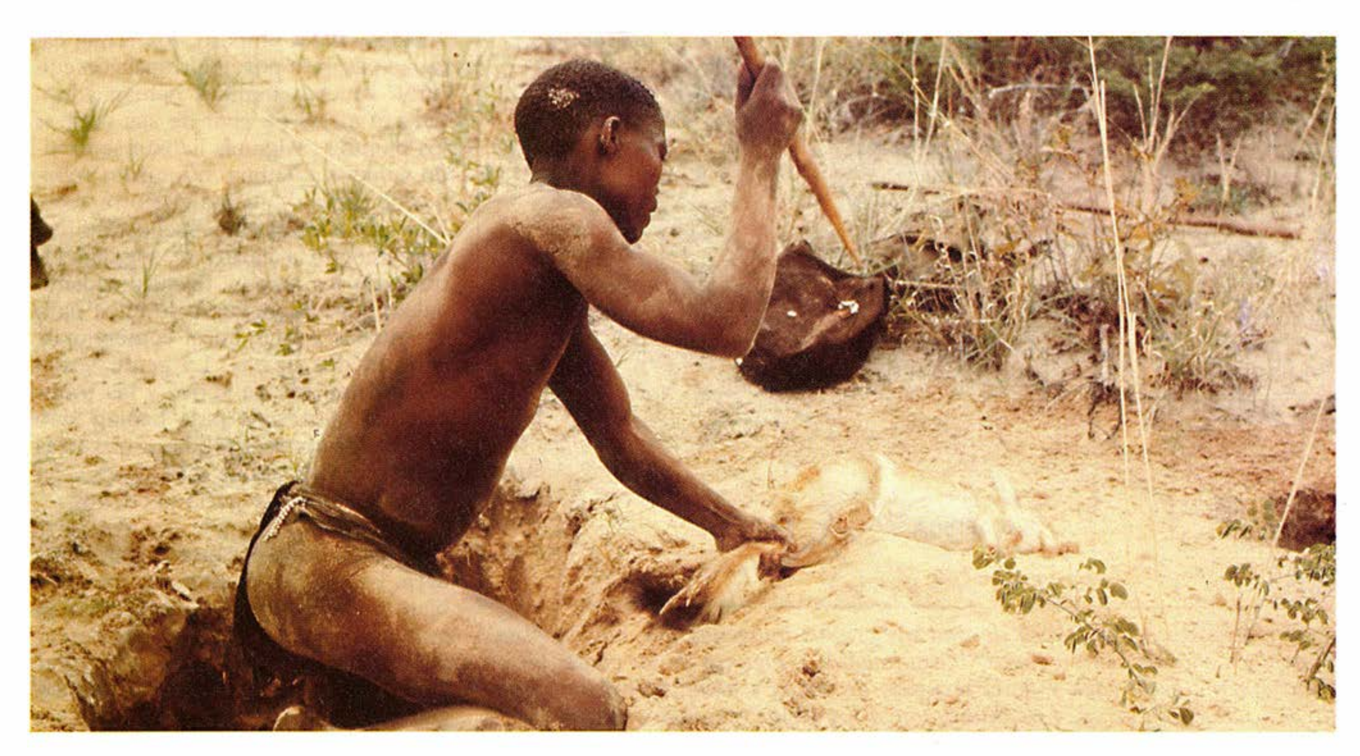
Modos de vida tradicionales. ¿Cuáles eran los modos de vida tradicionales de los !kung? Observaciones que se hicieron a lo largo de los años 1950 y 1960 ponen de manifiesto que la estrategia del grupo para obtener el sustento –y en realidad toda su organización social– estaba adaptada a la supervivencia en el Kalahari.

Ante la necesidad de asegurarse la comida, los !kung seguían una estrategia "generalista", en vez de especializarse en la búsqueda de un número limitado de especies. Los varones cazaban animales de más de 60 especies, en tamaños desde la liebre hasta el antílope. Las mujeres reconocían más de 100 especies de plantas comestibles y recogían quizás una docena de variedades en un solo día.

La aceptación de ciertas pautas minimizaba las competencias por hacerse con los limitados recursos del desierto. Se organizaban en bandos, cada uno de los cuales tenía derecho a procurarse la comida en determinadas áreas. Durante la estación seca,

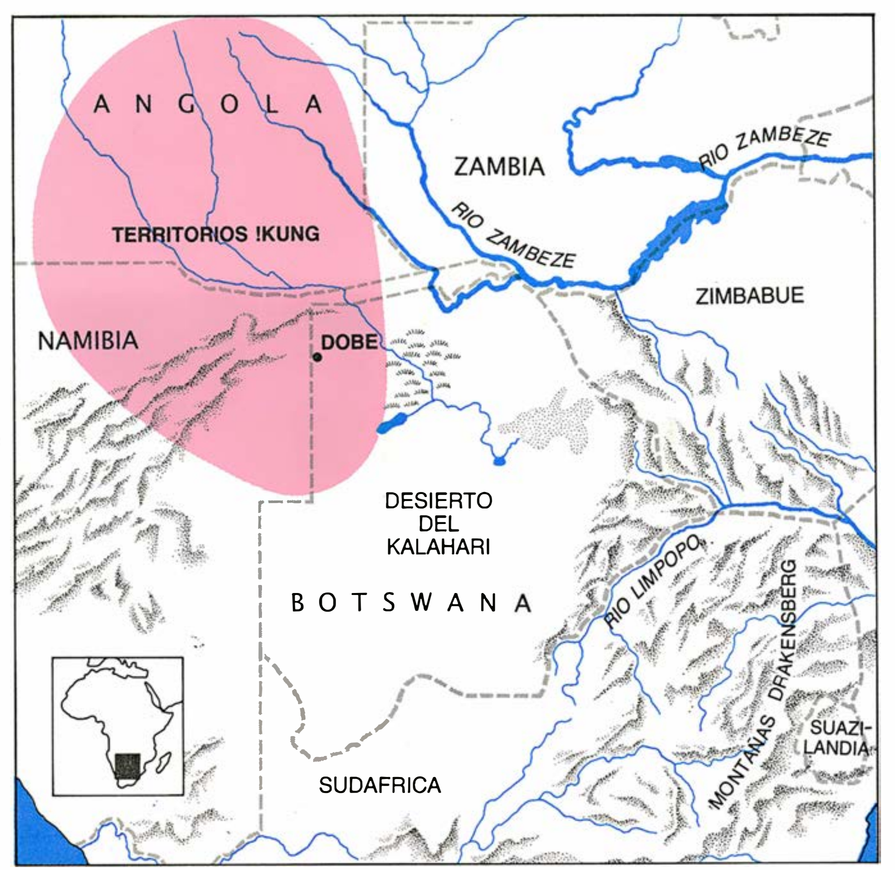
los miembros del mismo bando solían reunirse y acampar junto a alguna charca, que se entendía pertenecer a aquel bando. Los individuos de éste, por separado o en pequeñas cuadrillas, salían cada día del campamento esparciéndose en abanico para buscar comida. Durante el resto del año, cuando las precipitaciones eran más frecuentes y el agua de lluvia quedaba recogida en las depresiones someras del terreno, se dispersaban los bandos; pequeños grupos cazaban entonces en zonas menos transitadas, permaneciendo de ordinario en el mismo lugar no más de un día (y raramente tanto como dos meses) antes de pasar a otros sitios.

Bandos y relaciones de parentesco. El sistema de bandos facilitaba la emigración a territorios más apetecibles cuando el que le había caído en suerte a un bando se agotaba. La pertenencia al bando era bastante fluida, de modo que una familia podía juntarse con facilidad a otro bando al que le estuviesen yendo mejor las cosas.





*1. DE AYER A HOY. Los hombres !kung se aseguraban el sustento con la caza (*arriba*). Hoy tienen rebaños de animales domésticos (*abajo*). Sus muchachos no aprenden ya a cazar. Estos cambios en su conducta son sólo algunos de los muchos que han llegado a ser más evidentes durante los últimos 20 años. Los !kung, que antaño eran sumamente móviles y podían llevar a cuestas todo lo que poseían, tienen ahora baúles llenos de pertenencias y se han vuelto mucho más sedentarios, menos dependientes unos de otros y más entremezclados con gentes de otras estirpes.*



2. SUDAFRICA es la patria de muchos grupos indígenas que hablan "san" (conocidos en otro tiempo como "bosquimanos"), algunos de los cuales vivían esencialmente de la caza y de la recogida de frutos y plantas silvestres, hasta muy entrado el siglo xx. Los !kung, quizá los mejor estudiados de los "san", ocupan el Desierto de Kalahari en partes de Bostwana, Namibia y Angola. Mucho de lo que se sabe de este grupo se debe a los estudios antropológicos y arqueológicos hechos por varios investigadores en la región Dobe de Bostwana.

Considérense las opciones que se les ofrecían a un hombre y a su esposa que, por lo escaso de sus bienes, tendrían poca impedimenta que obstaculizase sus traslados. Podían reclamar el derecho a unirse a los bandos asequibles a sus respectivos padres, lo que significa que al menos les estarían abiertos cuatro territorios. Pero además podían juntarse a cualquiera de los bandos en que sus hermanos o hermanas tuvieran derechos. Y si la pareja contaba con hijos casados, podría, alternativamente, procurarse el alimento dondequiera que pudiesen hacerlo las esposas de sus hijos. Los padres arreglaban en muchos casos los matrimonios de sus hijos con la mira puesta en los privilegios territoriales que tales bodas les reportarían.

Los valores sociales de los !kung complementaban este flexible sistema de bandos, ayudando a asegurar que los alimentos se distribuyesen equitativamente. Y lo más notable aún es que el núcleo de lo que ellos mismos describían como sistema de valores !kung estaba formado por una ética del compartir. De las familias se esperaba que acogiesen bien a los parientes que asomasen por sus campamentos. Más todavía, las normas de buena conducta dictaban que la carne de las grandes piezas de caza fuese compartida con individuos no pertenecientes a la familia inmediata, lo que constituía una acertada estrategia de supervivencia.

Los individuos establecían también relaciones formales con no parientes intercambiándose regalos (cuchillos o lanzas de hierro) a irregulares intervalos de tiempo. Seleccionaban intencionadamente, para hacerles regalos, a sujetos de territorios distantes. A buen seguro se esperaba que un deudo tendría algo que ofrecer cuando en el lugar se hiciese difícil obtener bienes.

Una sociedad móvil y acéfala. La movilidad era un prerrequisito indispensable para mantener las relaciones de reciprocidad a largas distancias y posibilitar el traslado a cualquier parte cuando las condiciones de un sitio no fuesen ya favorables. El sistema !kung de justicia implicaba la misma exigencia de un movimiento pronto. La sociedad !kung era acéfala, sin jefe supremo: nadie estaba encargado de dirimir las disputas. Si llegaba a haber desacuerdos graves, los individuos o los grupos discordes ponían simplemente distancia entre sí, reclamando el entrar a formar parte como miembros en bandos muy separados y distintos.

Hacia 1975, empero, los !kung estaban pasando por una transición cultural. Muchas familias habían adoptado el modo de vivir de sus vecinos los bantúes. Algunas habían sembrado campos y habían adquirido rebaños de cabras y alguna que otra vaca. Muy pocos de los muchachos estaban aprendiendo a cazar; se seguían fabricando los arcos y flechas tradicionales, pero la mayoría de ellos para eventuales ventas en el comercio de curiosidades típicas. La gente vestía ropa producida en serie, y las tradicionales chozas de paja habían sido sustituidas por más sólidas estructuras de paredes de adobe que ahora eran habitadas durante períodos largos.

Transformación causada por el dinero. En muchos de estos cambios habían tenido su parte de influencia la moneda y la abundancia de mercaderías. Bostwana se convirtió en nación independiente en 1966. El nuevo gobierno empezó a fomentar la cría de ganado y el desarrollo de la agricultura, dándoles a los !kung entre otras cosas jumentos con que tirar de unos rudimentarios arados. Dispuso también la regular adquisición de las manufacturas de la artesanía tradicional (por ejemplo, de los collares de cuentas y abalorios), introduciendo así en el seno de la comunidad sumas extraordinarias de dinero. Posteriormente, cuando a los !kung de Namibia (a la sazón colonia británica) se les hizo entrar a formar parte del ejército de Sudáfrica, los !kung de Bostwana recibieron más ingresos de dinero en efectivo y mayor afluencia de mercancías, sobre todo a través de intercambios con sus parientes.

Los campamentos seguían, sin embargo, ocupados de ordinario por la misma extensa familia y sus parientes próximos, aunque la mezcla concreta de los individuos cambiaba algo de un año a otro.

A mediados del decenio de 1970 algunos de los añejos valores de los !kung, tales como la alta estima de la amistad y de la interdependencia, no estaban ya guiando la conducta con tanta eficacia como la guiaban en otros tiempos. Los datos indicaban también que, a pesar de las apariencias en contra, los !kung seguían conservando su "mentalidad" cazadora-

recolectora. Estos "generalistas" habían adoptado el pastoreo como si sus cabras y sus escasas vacas no se diferenciasen de cualquier otro recurso accesible mediante la caza. Tan sorprendente descubrimiento significaba que en la raíz de la transformación de los !kung había otros factores distintos del fracaso del sistema de asegurarse la comida.

Los campamentos !kung tradicionales, tal como aparecían representados en los primeros 25 mapas realizados por Yellen, estaban dispuestos típicamente en círculo, con las entradas de las chozas orientadas hacia el interior del mismo. Las chozas se alzaban todas muy próximas entre sí, por lo que desde el acceso a cada una podría verse el interior de la mayoría de las otras.

La disposición del campamento siguió siendo cerrada e íntima hasta comienzos de la década de los setenta. A partir de entonces aumentó la distancia entre las chozas. Al mismo tiempo, el patrón circular se fue sustituyendo por el lineal y por otras disposiciones que daban a las familias mayor privacidad; muchos hogares, que anteriormente eran los centros de una gran interacción social, estaban ya situados dentro de las chozas y no delante de ellas. Los cambios se produjeron con tanta brusquedad que puede decirse que, en unos pocos años, el modelo de disposición del campamento se había transformado de recogido e "intimista" en disperso y "distanciante".

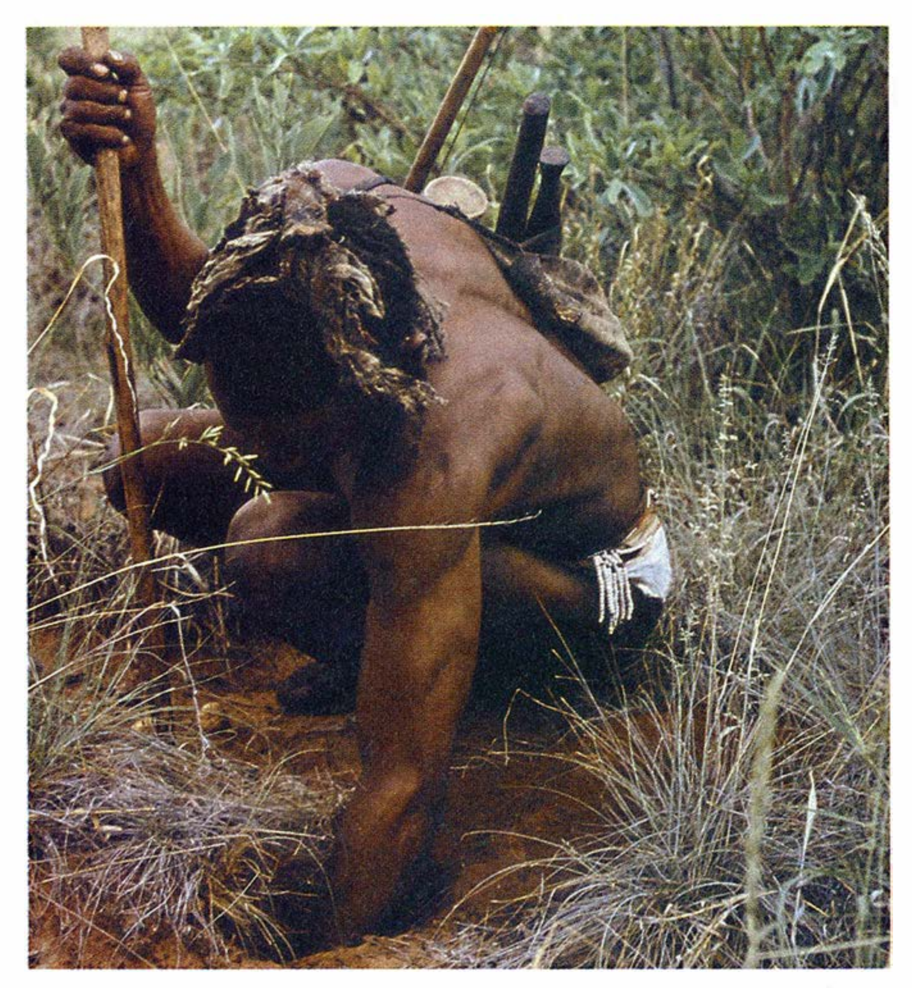
Del compartir al acaparar. En 1976 Diane E. Gelburd inventarió las posesiones materiales de los individuos que vivían en Dobe y comparó sus datos con los de una inspección llevada a cabo por Lee en 1963. Pues bien, mientras Lee había observado que la mayoría de la gente podía transportar fácilmente todas sus pertenencias, Gelburd se encontró con una situación enormemente distinta.

Comprobó Gelburd que muchos !kung poseían un gran ajuar, como por ejemplo arados, ollas metálicas y otros artefactos difíciles de llevar a cuestas. Con la reciente afluencia de dinero contante y sonante se habían comprado artículos tales como abalorios de vidrio, vestidos y cantidad de mantas que iban amontonando en baúles de metal (muchos de ellos cerrados con llave) dentro de sus chozas. En numerosos casos esos artículos excedían con mucho las necesidades de una sola familia y podían considerarse a lo sumo como una forma de ahorro o de inversión. En otras palabras, los !kung se estaban comportando de maneras claramente contrarias a las de su tradicional sistema participativo.

La presencia en Dobe de animales domésticos y de campos cultivados movió a Yellen a preguntarse si los cambios que veía en los !kung podrían estar en conexión, a través de alguna secuencia de eventos, con la insatisfacción respecto al régimen de caza-recolección. Si los huesos revelaran que a mediados del decenio de los setenta los !kung obtenían su alimentación casi exclusivamente de los animales domésticos, podría entonces concluirse que a los otros cambios sociales les había precedido el de la estrategia de subsistencia y, por tanto, que éste habría originado de algún modo aquéllos.

Los datos confirmaron a Yellen las más tempranas impresiones de que durante el decenio de los años cincuenta los !kung eran casi exclusivamente cazadores y recolectores: en los sitios de aquel período son raros los huesos de animales domésticos. Después, por los años sesenta, el consumo de carne de cabra y de vacuno aumentó notablemente; de hecho, por los años 1974 y 1975 se consumió más carne de estos animales que de cualesquiera otros. Durante el mismo período se incrementó también la frecuencia del consumo de carne de pollo. Por la misma época –de 1944 a 1975– fue disminuyendo la gran popularidad que habían tenido antes ciertos animales salvajes, entre ellos el kudú mayor (gran antílope que solía ser cazado en la estación seca) y dos antílopes más pequeños (el *steenbok* y el *duiker*).

A primera vista estos datos podrían sugerir que los !kung habían ido en realidad abandonando la caza. Pero un examen más detenido de la cuestión puso en claro que la res vacuna venía a ser en esencia un sustituto del kudú, siendo una y otro animales grandes, y que las cabras, de tamaño aproximado al del *steenbok* y al del *duiker*, reemplazaron a estos animales en la dieta. Resulta, por ende, que el número de especies representadas



3. ESTE CAZADOR que escarba y horada el suelo en busca de raíces o tubérculos comestibles ejemplifica el enfoque tradicional, generalista, de los !kung respecto a la obtención de comida. Los !kung se enfrentaban a lo impredecible de la disponibilidad de sustento en el Kalahari comportándose de manera flexible y adaptable. Si no podían obtener un tipo de comida, se conformaban con una serie de sustitutos.

en cada campo siguió siendo esencialmente el mismo, e igual también la mezcla de especies pequeñas, medianas y grandes.

Estos hallazgos prueban que los !kung no redujeron la variedad en su dieta, como habría sido de esperar si hubiesen abandonado su tradicional estrategia generalista y se hubiesen dedicado a convertirse en pastores, que dependen de sólo unas pocas especies de animales. Desde el punto de vista de los !kung, las cabras eran en lo esencial iguales que cualquier otro animal de tamaño mediano (puesto que proporcionaban una cantidad razonable de comida y eran relativamente fáciles de llevar), y las vacas equivalían también a otros animales grandes.

Pervivencia de la identidad original. Diversos informes anecdóticos corroboran la tesis de que, en realidad, los !kung de 1975 no se veían a sí mismos como pastores o ganaderos. Por ejemplo, mientras los grupos bantúes, que dependen de sus rebaños para comer y para el prestigio, matan en seguida a la hiena que atacó a sus animales, muchos hombres !kung no se molestan en hacerlo. No habrían sido tan indiferentes si hubiesen considerado a sus rebaños y ganados como el más importante de todos los recursos de subsistencia. Semejantemente, parecían concebir la agricultura y los trabajos a sueldo que realizaban para los bantúes y los antropólogos –actividades que emprendían sólo a tiempo parcial y a corto plazo– aproximadamente del mismo modo que se tomaban el pastoreo y la cría de ganado: como recursos tan similares a su viejo régimen como cualquier otro.

Así, muy entrados ya los años setenta, los !kung seguían practicando su estrategia generalista, sin limitar su dependencia a ningún tipo único de recursos. Si ni las tripas vacías ni coerción alguna iniciaron la transformación de los !kung, ¿qué fue lo que la puso en marcha?

Tan pronto como los !kung tuvieron fácil acceso a la riqueza dineraria, decidieron adquirir objetos que antes nunca habían estado a su alcance. Empezaron en seguida a acaparar y a guardar en vez de depender ya de otros a base de intercambiarse regalos, con lo que se fueron alejando de su pasada interdependencia recíproca. Al mismo tiempo, quizás en parte por la vergüenza del no compartir, se procuraron privacidad. Donde antaño las normas sociales invitaban a la intimidad, hubo ahora separación entre las palabras y las obras. Las chozas se separaron y se volvieron de espaldas unas a otras, y algunos de los fogoncillos fueron trasladados al interior, por lo que todas las actividades sociales que habían solido tener lugar alrededor de ellos se volvieron más privadas. Los muchachos preferían la más fácil tarea del pastoreo.

Entre tanto, la adquisición de bienes limitó la movilidad, cambio éste que vino a reflejarse en la erección de chozas semipermanentes, con pared de adobe. La falta de movilidad trajo consigo aún más cambios, en parte porque la gente no podía ya resolver sus diferencias y rencillas a la manera tradicional, yendo a juntarse con algunos parientes en cualquier otro paraje de los territorios !kung.

En manos de los bantúes dominadores. Al no contar ya con los medios tradicionales de dirimir sus disputas, los !kung hubieron de acudir en demanda de arbitraje a los jefes locales bantúes, en este proceso sacrificaron su autonomía y, lo mismo que otros grupos "san", aumentaron su dependencia de la sociedad bantú y su incorporación a ella. De hecho, es corriente que muchas familias !kung mantengan estrechas relaciones con individuos bantúes a los que consideran como sus protectores Por su parte, los bantúes han aceptado el papel y a menudo hablan de "mis bosquimanos". La unión matrimonial de mujeres !kung con hombres bantúes es actualmente bastante común, señal que nada bueno augura para la cohesión de la sociedad !kung.

Estudios genéticos sobre muchos pueblos sudafricanos de habla bantú demuestran que los de habla khoisan llevan siglos fusionándose con las sociedades bantúes. Muy posiblemente algunos de estos grupos khoisan y los similares en cualquier parte del mundo seguirían un proceso de transformación bastante parecido al que ahora se está dando entre los !kung de Dobe; esto es, la adquisición de bienes les llevó a una falta de movilidad y al surgimiento de tensiones sociales funestas para la cohesión del grupo.

Azaroso equilibrio puntuado

En 1972, dos paleontólogos, Niles Eldredge, del Museo Americano de Historia Natural, y Stephen Jay Gould, de la Universidad de Harvard, provocaron el escándalo entre los biólogos al sugerir que la idea de evolución que la mayoría de ellos tenía era una "imagen insuficiente". Para Eldredge y Gould, la vida no era un majestuoso despliegue de formas que cambiaban en un proceso gradual y que se dividían lentamente para crear nuevas especies. Antes bien, defendían la rauda aparición de nuevas especies, fruto de explosiones rápidas de cambio evolutivo. En su opinión, se equivocaban sus colegas cuando atribuían la escasez de secuencias fósiles intermedias a lagunas del registro fósil. Proponían, en opción alternativa, que tal rareza debíase a que la evolución había procedido de un modo distinto. Eldredge y Gould consideraban más probable que las nuevas especies evolucionasen en unos cuantos miles de años, un simple parpadeo en la escala geológica del tiempo. Concluida la fase evolutiva de la especie, argumentaban, entraba ésta en un período de estasis, y permanecía inalterada durante, quizá, millones de años. Hablaban, así, de una evolución a saltos, de un equilibrio puntuado.

Eldredge y Gould no se limitaron a dibujar una nueva imagen del proceso de evolución. Sugirieron que la teoría de Darwin de la selección natural, según la cual ésta actúa sobre los individuos, era inadecuada, porque predecía la evolución gradual de las especies en respuesta al cambio ambiental. Con el fin de reconciliar el equilibrio puntuado con las tendencias a largo plazo que se observan en las estirpes fósiles (tal la progresión desde especies de proporciones reducidas hacia especies mayores en los mamíferos), Eldredge y Gould propusieron una modificación de la teoría de Darwin. La selección natural no sólo operaría sobre los individuos, sino también sobre la propia especie: habría selección de especie. A tenor de esta teoría, las estirpes prosperan si resisten la extinción o si producen frecuentes especies hijas. Gould llegó a sentenciar que "la teoría sintética" (la teoría de la selección natural de Darwin combinada con la genética) estaba "irremisiblemente muerta", incapaz de explicar las tendencias evolutivas a largo plazo.

¿Cómo le ha ido al equilibrio puntuado desde su presentación hace casi 20 años? Muchos biólogos dicen que Eldredge y Gould atacaron un espectro que ellos se habían fabricado; aducen que nunca se consideró la evolución algo exclusivamente lento y gradual, ni que la selección natural no fuera muy capaz de explicar la formación de especies en miles de años, como requiere el equilibrio puntuado. Ernst Mayr apelaba al propio Darwin, quien escribió en las últimas ediciones de *El origen de las especies*: "los períodos durante los cuales las especies han sufrido modificación...

han sido probablemente breves en comparación con los períodos durante los cuales estas mismas especies permanecieron sin sufrir cambio alguno".

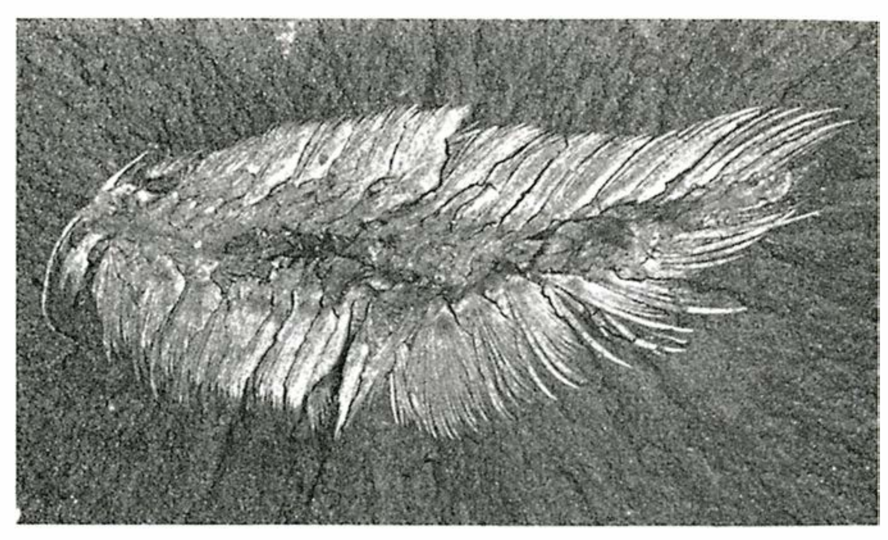
Mayr, decano, para muchos, de la biología evolutiva, propuso en 1954 que "las revoluciones genéticas" en poblaciones pequeñas y aisladas podían dar origen a nuevas especies, idea en la que Eldredge y Gould han reconocido beber. Aunque Mayr les echa en cara haber incurrido en "afirmaciones fantasiosas", les concede el acierto de haber llamado la atención sobre la estasis en los linajes fósiles. Según Mayr, tales períodos (algunos de los cuales durarían decenas de millones de años) son causados por limitaciones genéticas y de desarrollo que condicionan el cambio.

Jeffrey S. Levinton es uno de los mayores críticos del equilibrio puntuado, porque existen "literalmente multitud" de buenos ejemplos de cambio gradual. Y ¿cómo puede corroborarse la teoría cuando no hay manera de reconocer con claridad en el registro fósil la formación de especies? Levinton concluye que "tomadas en su conjunto las pruebas, nos hallamos ante una teoría que no vale la pena seguir".

Antoni Hoffman, que ha escrito un libro destinado a refutar el equilibrio puntuado, acusa a los autores de la teoría de crear un blanco móvil. Según el análisis de Hoffman, algunas versiones de la teoría sólo afirman que la evolución varía en ritmo, lo que nadie discute. Las últimas propuestas del puntualismo sostienen ya que el cambio gradual no existe o es despreciable; tamaña conclusión constituye "una falsedad flagrante".

En 1987 Peter R. Sheldon asestaba un duro mazazo contra el equilibrio puntuado cuando dio a conocer la evolución gradual de ocho tipos de trilobites a lo largo de un intervalo de tres millones de años, durante el período Ordovícico, hace más de 440 millones de años. El descubrimiento impulsó a John Maynard Smith a comentar que "podemos olvidarnos de nuevos paradigmas y de la muerte del neodarwinismo". Pero el debate sigue abierto, y cada bando continúa aportando sus pruebas. Por citar un caso, Adrian M. Lister señalaba recientemente que el ciervo común de la isla de Jersey sufrió una reducción de seis veces en su peso corporal en menos de 6000 años, lo que sugiere que la evolución rápida puede ocurrir en determinadas condiciones.

Gould tilda de débil la interpretación que Sheldon hace del registro de los trilobites, si bien acepta que los paleontólogos pueden discernir la formación de nuevas especies en el registro fósil mediante la comparación con especies actuales. Admite la falta de datos contundentes y sugiere que la dificultad técnica de encontrar pruebas sólidas, en forma de fósiles conservados en buen estado procedentes de yacimientos sedimentarios sin alterar, ha sido la causa del lento progreso. Aunque concede que el cambio rápido no es ley universal, declara que se probaría que él y Eldredge tienen razón si la formación de especies rápida y la estasis acaban por dominar en el registro fósil.



4. CANADIA SPINOSA *es uno de los extraños animales cuyos restos se encontraron en Burgess Shale. Stephen Jay Gould piensa que los pocos tipos primitivos que sobrevivieron y dieron origen a los grupos posteriores simplemente tuvieron suerte.*

¿En qué queda entonces el problema de la selección de especie? La mayoría de los evolucionistas coinciden con Hoffman en que tal selección no puede explicar los rasgos de los individuos, aunque en principio podría justificar algunas de las tendencias a largo plazo en la evolución. Pero no hay ejemplos comprobados, y la idea pudiera ser, tal como señala Hoffman, "una explicación en busca de fenómenos que explicar". Montgomery W. Slatkin señala que incluso en el caso de que el equilibrio puntuado resulte ser común en la evolución, podría venir impulsado por la selección natural que opera sobre los individuos.

La selección de especie ha sido criticada también por un paleontólogo alabado por Gould en su último libro, *Wonderful Life*. Gould recrea el yacimiento de Burgess Shale, en Columbia Británica, cuyos esquistos contienen los restos de extraños animales de cuerpo blando que aparecieron en la Tierra hace unos 530 millones de años, poco después de los organismos pluricelulares, al principio del período Cámbrico. La investigación ha demostrado que los fósiles de Burgess Shale no sólo encierran una sorprendente complejidad, sino también que son pocos los que encajan en las clases taxonómicas conocidas.

Uno de los héroes de esa recreación de Gould es Simon Conway Morris, quien reconstruyó minuciosamente algunos ejemplares. Conway Morris acaba de escribir en *Science* que no ve necesidad de mecanismos evolutivos extraños (como la selección de especie) para explicar la vigorosa diversidad de Burgess Shale. "No hay razón, añade, para pensar que hubiera especies que no surgieran por selección natural."

Gould responde que se le hace difícil imaginar que la selección natural no participe en la formación de especies, y destaca el papel del azar en la creación de los reordenamientos genéticos que pueden originarlas. La verdad es que la intervención del azar es la principal lección que Gould saca de los fósiles de Burgess Shale. A cualquier biólogo le habría sido imposible, agrega, predecir cuáles de la miríada de animales de Burgess Shale iban a dar origen a los grupos posteriores. Gould interpreta la supervivencia de las especies como una lotería controlada por episodios históricos fortuitos.

Sobre este punto, Gould y sus críticos, por una vez, están de acuerdo. Las implicaciones de un papel estelar para Doña Suerte son profundas. Si el drama de la evolución tuviera que "interpretarse" de nuevo, la fauna y la flora terrestres serían radicalmente distintas.

Ciencia y empresa

Honores para los "poco corrientes"

En tiempos recientes, la aplicación masiva y a escala planetaria de los resultados de la ciencia y la tecnología ha producido impresionantes modificaciones en nuestra forma de vida, en la organización social y en nuestra perspectiva del mundo que nos rodea. Se tiene, sin embargo, la sensación, bastante justificada, de que en este contexto la capacidad innovadora del individuo aislado es casi nula y de que el nivel de refinamiento o la magnitud que ahora se requieren para que un proyecto pueda ser considerado interesante hacen ineludible la participación de entidades poderosas, como son los organismos públicos nacionales o internacionales o las grandes compañías privadas, para allegar los recursos materiales necesarios.

Resulta por ello muy gratificante saber que, a pesar de todo, no está completamente extinguida la especie, en otras épocas más prominente, de los aventureros, los inventores o los eruditos por cuenta propia. Existen también algunas entidades que miran con buenos ojos a este grupo anárquico de seres imaginativos y emprendedores y tratan de ayudarles en la consecución de sus sueños, prestándoles audiencia y dando a conocer sus logros fundamentalmente, pero también contribuyendo económicamente en alguna medida a hacerlos posibles.

La empresa Rolex, afamada fabricante suiza de cronómetros y relojes mecánicos de la máxima calidad, es probablemente la más destacada de ellas. Desde que en 1976 estableciera los Premios Rolex a la iniciativa, ha venido distinguiendo cada tres años a cinco de entre los miles de personas de todo el mundo que someten proyectos "poco corrientes", como reza la convocatoria, pertenecientes a tres grandes campos de la actividad humana: ciencias aplicadas e inventos, exploraciones y descubrimientos, y ecología. Se pide además que sean novedosos, interesantes, realizables por los candidatos y, de forma menos claramente formulable, que tengan un cierto calor humano. Acaban de darse a conocer los resultados de la quinta convocatoria.

Rolex denomina a sus premios "Award for Enterprise" y publica amplios resúmenes de una selección de los proyectos recibidos en un interesante libro titulado "Spirit of Enterprise". Y en este punto se impone una digresión: es curiosa la evolución que en español ha tenido la palabra "empresa", que hace ininteligibles ambas expresiones inglesas si se traduce sin más "enterprise" por "empresa", y aconseja utilizar en su lugar la palabra "iniciativa", mucho más neutra. Sin embargo, a lo largo de muchos siglos los hispanoparlantes la hubiesen entendido sin ninguna ambigüedad en su sentido originario de empeño aventurero y azaroso, exigente de esfuerzos inusuales para llevarlo a término, sentido del que en el uso contemporáneo del lenguaje no quedan más que remotos ecos. ¿Qué puede explicar este vuelco semántico, este enmascaramiento del impulso originario por el resultado ya cristalizado, de la creatividad por la burocracia?

La variedad de los proyectos presentados es enorme, así como el ingenio y el esfuerzo desplegados en su realización. Generadores de energía, conservación de instrumentos antiguos, vehículos ligeros, investigaciones arqueológicas, programas de ayuda comunitaria, métodos y aparatos para ayudar a los minusválidos, alimentos, reintroducción de plantas y animales a los lugares de los que desaparecieron, la vuelta a la tierra por el ecuador en bicicleta..., todo un caleidoscopio de ilusiones interesantes seguidas con tesón a lo largo de los años por sus creadores.

Los premios de 1990 se han concedido: a J. F. Asmus por un proyecto para devolver sus colores originales a los 6000 guerreros de terracota descubiertos en 1974 en la tumba del emperador Qin Shih Huang Ti de China, por un procedimiento de reducción catalítica de la oxidación sufrida a lo largo de los 22 siglos que estuvieron enterrados, usando impulsos de láser; a W. A. Moran por la reconstrucción de un junco chino del siglo XIII, con el que se propone realizar el viaje de vuelta de Marco Polo por la ruta de la seda; a S. W. Prawiroatmodjo por la construcción del primer centro de educación ambiental de Indonesia, destinado a formar profesores y alumnos en las comunidades rurales; a A. Studer por un programa de reforestación y educación ecológica comunitaria en el noreste de Brasil; y a L. Stocker por la creación de un hospital en el que se atiende a los animales salvajes heridos para ponerles luego en libertad cuando se encuentran en condiciones.

Recibieron el premio, consistente en un diploma, 50.000 francos suizos y un cronómetro Rolex de oro, en una ceremonia celebrada en Ginebra el pasado 26 de abril. Se conceden además 35 menciones honoríficas a otros tantos proyectos, de cuyos títulos se hace entrega en el país del galardonado.

Echando raíces

No ha sido fácil llevar al mercado los medicamentos producidos por elaboración biotecnológica. Pero si lo comparamos con la introducción de cosechas obtenidas por manipulación genética, ha constituido un paseo militar. Desde 1987, el Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) ha expedido más de 50 permisos para experimentos de campo de plantas modificadas. Están pendientes más de 20 solicitudes. En campos experimentales hay tomates que maduran y no se pudren, soja y algodón que resisten enfermedades y toleran pesticidas y herbicidas. No obstante, pasará un lustro por lo menos antes de que esos plantones estén en manos de los agricultores.

La ola se ha propagado y todo el que ha podido se ha metido en la fiesta. Las pruebas del USDA van encaminadas a asegurar que las plantas sean benignas para el ambiente. Algunos ensayos, sin embargo, han atraído especial atención, pues se teme que los genes que confieren resistencia a los pesticidas se dispersen mediante polinización cruzada. Se ha de vigilar también que esos nuevos alimentos sean inocuos en el consumo humano. No faltan los grupos ecologistas decididos a poner palos en las ruedas.

Cuesta más modificar las plantas que inducir la síntesis bacteriana de insulina, productos de factor de coagulación y otras proteínas. Sólo se necesita un único gen para instruir a las

células la fabricación de esos productos farmacéuticos. Pero las características vegetales por las que el consumidor está dispuesto a pagar un extra, tales como el sabor y la textura, están controladas por más de un gen. De ahí que las empresas del sector agroalimentario primaran, en un comienzo, los intereses del campesino sobre los del consumidor. Añádase a ello que, en muchos países, el campo es la cenicienta de los beneficiarios de las subvenciones gubernamentales para la investigación, promoción y desarrollo.

Pese a esas dificultades, muchas plantas mejoradas con manipulación genética han pasado ya del laboratorio-invernadero al campo. Dos variedades de tomates se encuentran, ahora, a un tiro de piedra del mercado. La empresa norteamericana Calgene solicitará a su gobierno que le autorice la venta de una raza de tomates que permiten un almacenamiento más prolongado.

El tomate de Calgene porta un gen para fabricar ADN "antisentido". La secuencia antisentido se pega a la normal y la bloquea; en este caso, la interesada es una enzima que degrada la pectina y causa la podredumbre. Los tomates "a medida" maduran en todos los demás aspectos, enrojeciendo y desarrollando componentes del sabor que faltan en las variedades rosadas predominantes en los supermercados.

Es también probable que el otro tomate a medida, de la compañía Monsanto, supere pronto las pruebas requeridas. Una suerte de vacunación prenatal confiere a la variedad resistencia contra el virus del mosaico del tomate. La planta porta un fragmento de ADN vírico, y así, cuando la planta sembrada sufre el ataque, se encuentra ya protegida contra la infección.

No existe una normativa clara sobre las condiciones en que deben aparecer esas hortalizas reforzadas. Las compañías necesitan respaldo oficial en su momento más difícil: la aceptación del público. Algunos grupos ecologistas quieren que los alimentos genéticamente manipulados consten como tales. Las empresas se oponen ante el caos que provocarían medidas semejantes en las industrias de procesado. "Un tomate es un tomate", vienen a decir.

Los reacios a los métodos de ingeniería genética no ocultan su escepticismo ante cualquier empeño por obtener cereales que sean resistentes a ciertos herbicidas. Se trata, en su opinión, de una vulgar añagaza para





*1. PLANTAS DE ALGODON manipuladas por Calgene (*arriba, filas centrales*). Soportan tres o cuatro veces la dosis normal del herbicida Bromoxynil, de Rhône-Poulenc, merced a la incorporación de un nuevo gen. Los tomates manipulados por Calgene (*izquierda, abajo*) serán las primeras hortalizas en obtener la autorización de venta comercial.*

obligar a los agricultores a depender del producto de un fabricante particular. A mayor abundamiento, agregan los ecologistas, se incrementará el uso de productos químicos en la agricultura. Además, las plagas desarrollarían los mecanismos necesarios para burlar esa resistencia, como ocurrió con los productos químicos.

Las plantas manipuladas florecen ya en los campos experimentales. En los laboratorios anejos trabajan los investigadores para ampliar la batería de características deseadas. A corto plazo se prevé rebajar el contenido de grasas saturadas de la soja y otras semillas oleaginosas. Estas plantas podrían incorporar genes de los saludables ácidos grasos Omega-3, que se encuentran, de manera natural, en la caballa o el salmón. A medio plazo, se habla de conseguir que la raíz de ciertas plantas resistan a los insectos del suelo. La biotecnología aplicada a la agricultura es hoy una plantita sana, pero a la industria le espera todavía un largo surco por cavar.

Cazador de cáncer

Imagínese el lector mirando a través de un microscopio durante siete horas al día, sabiendo que la vida de alguien pende de un cabello si a usted se le escapa una célula cancerosa escondida entre una muchedumbre sana. Le estamos hablando de la sobrecogedora tarea de cuantos trabajan en los laboratorios de citotecnología y examinan manchas de Papanicolau en busca de cánceres cervicales. Muchos citotécnicos exploran 100 placas por día. Cada placa contiene 100.000 o más células; puede haber menos de 30 células anormales en una prueba de una mujer en las primeras fases de la enfermedad.

Se ha puesto la esperanza en un sistema, todavía experimental, que aligera en buena parte la carga del citotécnico y mejora la precisión de las pruebas. Desarrollado por Neuromedical Systems, Inc. (NSI), el sistema PAPNET, de construcción de imágenes por ordenador, usa un soporte lógico emulador de redes neurales para detectar las células cancerosas. Las redes neurales son procesadores de información que imitan el proceder del cerebro en su aprendizaje de la experiencia; han demostrado su eficacia en la identificación de sutiles diferencias de configuración, difíciles de definir.

La parte robótica del PAPNET es un armazón de acero negro, de unos 1800 centímetros cuadrados, que aloja las videocámaras, lentes de aumento y otros instrumentos del sistema. Los técnicos de NSI la designan con el apodo de "la roca", porque está montada sobre una placa de granito de diez centímetros de espesor que amortigua las vibraciones.

Cuando PAPNET empieza a funcionar, su brazo retira una placa de una caja y la coloca ante la cámara de la máquina para su inspección. El sistema de exploración primaria evalúa el estado de las células según reglas

LA GESTION DEL PLANETA TIERRA

Número extraordinario de

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Noviembre de 1989

geométricas, e identifica hasta un millar que parecen anómalas. El sistema de exploración secundario, la red neural, califica cada una de las 1000 células y clasifica su aparente anormalidad. Se registran, por último, en disco óptico las posiciones e imágenes en color ampliadas de las 64 células más sospechosas. Un citotécnico convoca después esas imágenes en un monitor de vídeo y las examina. Las células que el citotécnico considera preocupantes se apartan y transfieren a un patólogo para el diagnóstico final.

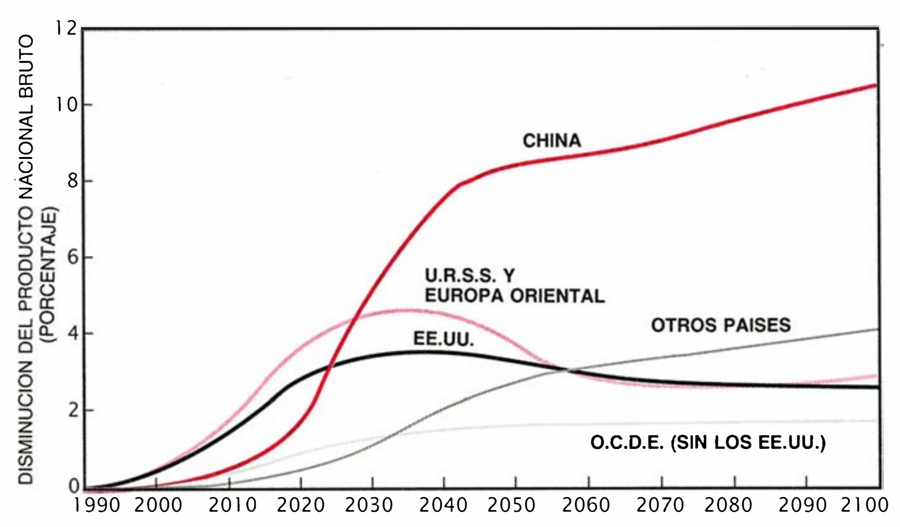
PAPNET sirve para diversos exámenes citológicos, pero ha habido una especial demanda para aplicarlo al análisis de las manchas de Papanicolau. Desde que se generalizó el empleo de la prueba de Papanicolau, hace más de 40 años, la mortalidad por tumores cervicales entre mujeres ha descendido vertiginosamente. A pesar de lo cual, las pruebas de Papanicolau muestran un elevado riesgo de error.

Según Leopold G. Koss, director del departamento de patología del Hospital Clínico Albert Einstein del Bronx, Nueva York, la tasa de pruebas de Papanicolau negativas falsas –es decir, la frecuencia con que se escapan a la detección estados precancerosos– oscila entre el 20 y el 30 por ciento en los laboratorios agobiados de trabajo. Parte de la culpa debe atribuirse a la labor, tediosa, del citotécnico. Mark R. Rutenberg, presidente de NSI, compara este trabajo con el de la corrección de pruebas de imprenta: "Una palabra mal escrita es, por sí sola, fácil de reconocer, pero hallar una diluida en un mazo de 100 páginas es harto difícil. La gente acaba cometiendo errores."

Los esfuerzos desarrollados hasta ahora por automatizar el examen de las manchas de Papanicolau han fracasado por un doble motivo, dice Rutenberg. Cuesta programar un ordenador con reglas fidedignas para discriminar entre células precancerosas y células normales superpuestas. El PAPNET orilla este problema porque su red neural no necesita tales reglas. Otras máquinas han tratado de desterrar la presencia de los citotécnicos clasificando las manchas de Papanicolau, pero un sistema absoluto, del tipo "luz roja, luz verde", está por encima de las posibilidades de la tecnología actual.

Hacia la economía ecológica

Los organizadores del Día de la Tierra no planeaban una celebración centrada en la economía. Durante muchos años, los economistas han ido a la greña con los ecologistas. Como gran parte de la teoría económica se centra en buscar la forma de sostener el crecimiento, se tendía en el pasado a olvidar el aumento de la contaminación o la disminución de las áreas boscosas, entre otros problemas ambientales. Uno o dos desastres podrían incluso mejorar el producto nacional bruto de un país si se gastara



2. *REDUCCION DE LAS EMISIONES DE CARBONO en un 20 por ciento. Esa caída podría detraer una apreciable fracción del futuro producto nacional bruto de los países, según cálculos realizados por Alan S. Manne, de la Universidad de Stanford, y Richard G. Richels, del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica. Los que salen mejor librados son los miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), es decir, Europa Occidental, Canadá, Japón, Australia y Nueva Zelanda.*

dinero en limpiar los correspondientes residuos.

Sin embargo, la reciente tendencia al calentamiento global, junto con la entrada en escena de otros problemas ambientales, están poniendo en apuros la idea de una economía de espaldas a la conservación del medio. Hay propuestas internacionales para reducir en un 20 por ciento la emisión de carbono a la atmósfera. Pero, ¿cuánto costará ese maridaje?

Un modelo reciente que merece atención es el desarrollado por Manne y Richard G. Richels, del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica. Usando estimas prudentes de la disponibilidad de combustibles y de la puesta en vigor de técnicas más rentables, Manne y Richels calculan que, para reducir las emisiones de carbono en un 20 por ciento en el año 2100, los Estados Unidos habrán de dedicar alrededor de 3,6 billones de dólares. Un supuesto más optimista, en el cual la demanda de energía disminuye y se usa ampliamente carbón limpio, recorta la cifra a sólo 800.000 millones.

Más confusa resulta su proyección internacional. La reducción de las emisiones de carbono en un 20 por ciento podría recortar el producto nacional bruto de diferentes naciones entre el 1 y el 10 por ciento [*véase la figura 2*]. Permitir a los países más duramente afectados por las restricciones, tales como China, duplicar sus emisiones de carbono, repartiría los costes del control de la contaminación de manera más justa; obligaría también a los países industrializados a reducir sus emisiones casi en un 70 por ciento para alcanzar una reducción global del 20 por ciento.

Muchos economistas pueden argüir que el mercado de la energía es "eficaz", es decir, que si una innovación supone ahorro, el mercado la promoverá. Otros no están convencidos de que el mercado intervenga. Señalan, por ejemplo, que los constructores tienen muy poco estímulo para llenar una casa con materiales aislantes, aun cuando ello suponga un recorte en las futuras facturas de energía; el constructor quiere mantener bajo el precio de venta. Como resultado, afirman, se puede ahorrar mucha energía con sólo una modesta inversión en aislamiento.

El punto clave es la importancia –y en último término, el coste– de tal derroche. Los economistas que creen que el mercado es muy ineficaz, estimarán ahorros más altos para la conservación y llegarán a costes más bajos para la reducción de emisiones.

Se debate con igual calor el tipo de energías alternativas que pueden desarrollarse y adoptarse, y su precio. Nadie sabe cuánto le costará a la economía llevar a la vida real los modelos ideados. Si los precios del petróleo se mantienen bajos, las empresas tendrán poco estímulo para gastar dinero en investigación de opciones más caras. Por otra parte, si la energía solar, la biomasa y el gas natural licuado se convierten pronto en alternativas competitivas del carbón y el petróleo, bajará el costo de la reducción de emisiones de carbono. La cantidad de energía proporcionada por las centrales nucleares también condicionará la previsión de costes.

Otras hipótesis de partida pueden determinar que los modelos económicos se inclinen por diferentes conclusiones. Las predicciones de crecimiento más lento se traducen en cambios graduales de la demanda de energía y en costes más bajos. Un sector de servicios creciente puede generar menos contaminación que la industria actual. "La predicción económica a corto plazo es ya bastante difícil. La predicción a largo plazo es punto menos que imposible", se afirma.

Evaluar los beneficios del recorte de las emisiones de carbono es terreno más espinoso que evaluar los costes. William D. Nordhaus, de la Universidad de Yale, es uno de los pocos expertos que busca establecer un marco para modelar los beneficios. Concentra su trabajo en lograr la síntesis de modelos ya aceptados. El trabajo de Nordhaus, no obstante, está plagado de advertencias cautelares.

En teoría, a los economistas les gustaría atinar en los beneficios de la reducción del carbono atmosférico calculando cómo un pequeño cambio de temperatura podría afectar a la estructura y naturaleza de los cultivos o al nivel del mar, y traducirlo así en pérdidas en la producción agrícola o en terreno edificable. Pero los investigadores que estudian la física de los cambios globales no pueden precisar los efectos específicos de los cambios de temperatura; los economistas carecen, pues, de base para ponderar los costes de tales cambios.

Todos están de acuerdo en un punto: la investigación sobre alternativas energéticas disminuirá el coste del control de las emisiones. Y la elaboración de modelos continuará. En los años setenta, la energía y el crecimiento económico parecían limitados por la escasez de recursos; la restricción real es hoy la capacidad del entorno para absorber los desperdicios.

Reactores avanzados de agua ligera

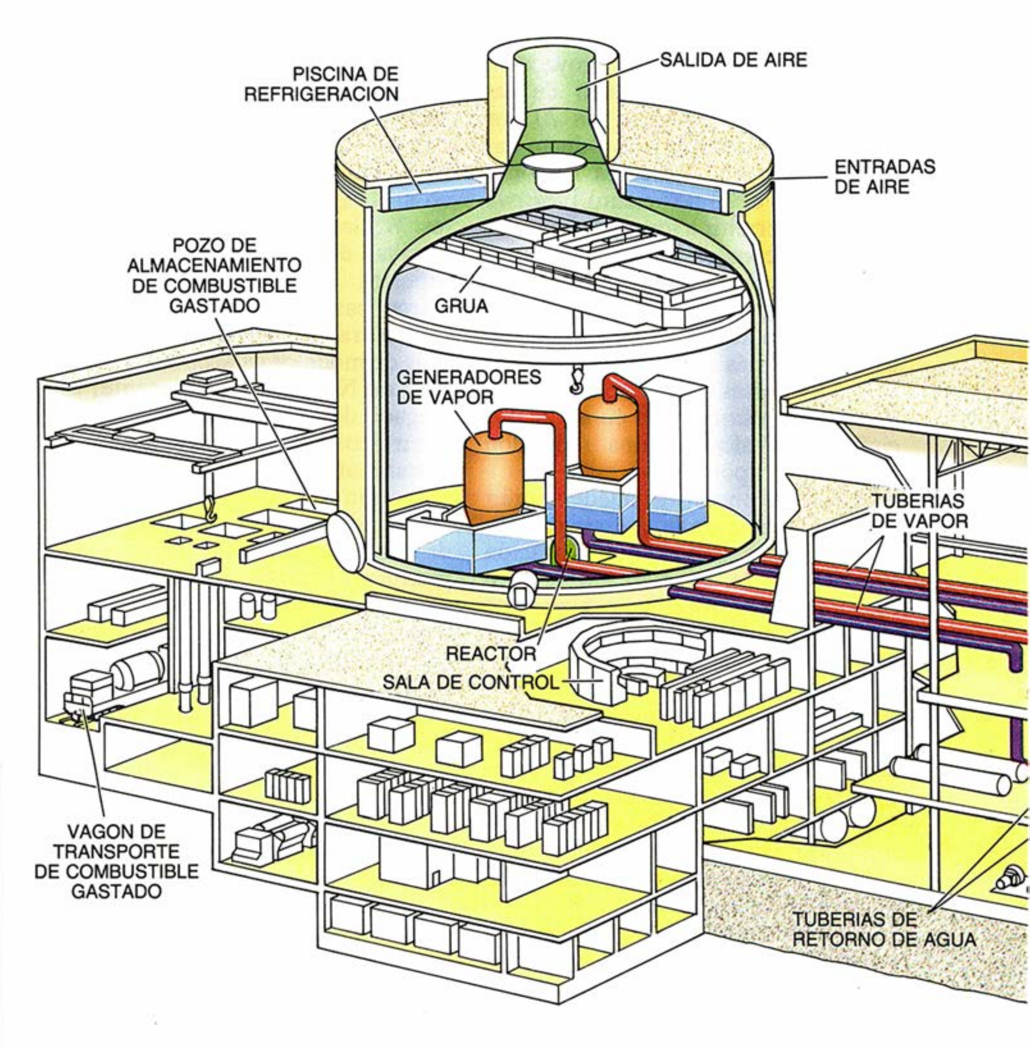
Nuevos diseños, en los que se introducen medidas "pasivas" de seguridad, pueden hacer más atractiva la energía nuclear, pero sólo en el caso de que se preste atención al factor económico, la gestión eficaz y la profesionalidad

Michael W. Golay y Neil E. Todreas

Una quinta parte de las 560 centrales nucleares que hay en el mundo operan en los Estados Unidos. Suministran la quinta parte de la electricidad del país. Esa dependencia de la energía nuclear adquiere mayores proporciones en muchas naciones industrializadas. Francia y Bélgica, a modo de ejemplo, obtienen de esta fuente casi el 80 por ciento de su electricidad. Aunque la inmensa mayoría de las centrales han funcionado correcta y rentablemente, algunas notables averías han alimentado la mala reputación de esta técnica y han frenado su desarrollo durante más de una década. Pero las inquietudes que despierta la energía nuclear se equilibran con el temor de que el consumo de combustibles fósiles, su principal alternativa, provoque el calentamiento global del planeta. ¿Recuperará la energía nuclear su antiguo lugar en la lista de opciones atractivas en el caso de que la opinión pública se preocupe más por su ausencia que por su presencia?

Los temores relativos a la seguridad de la energía nuclear se exacerbaron tras los accidentes de Three Mile Island, en 1979, y Chernobyl, en 1986. En Chernobyl la contaminación radiactiva se propagó y murieron más de 30 personas, mientras que en Three Mile Island los daños se limitaron a la propia instalación y no hubo que lamentar desgracias personales. La diferencia en el número de víctimas cabe atribuirla al núcleo del reactor de la central de Chernobyl, que carecía de un edificio eficaz de contención; no así Three Mile Island. El diseño soviético había recibido fuertes críticas por parte de la Comisión de Energía Atómica del Reino Unido. Aunque el diseño soviético se apartaba bastante del dominante en

MICHAEL W. GOLAY y NEIL E. TODREAS son profesores de ingeniería nuclear en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Golay dirige el centro de estudios avanzados sobre energía nuclear del MIT. Se doctoró por la Universidad de Cornell y fue profesor en el Politécnico de Rensselaer antes de ingresar en el MIT en 1971. Todreas estuvo al frente del departamento de ingeniería nuclear del MIT hasta junio de 1989 y presidió el comité de revisión industrial que inspeccionó el análisis del Departamento de Energía sobre el accidente de Three Mile Island.



1. NUEVO REACTOR DE AGUA LIGERA (RAL). El reactor, denominado AP-600 porque se trata de un modelo avanzado de agua a presión y produce 600 megawatt de potencia, está encerrado herméticamente en un cilindro de hormigón. Un bucle cerrado de agua a presión transporta calor

el mundo occidental, su espectacular fallo impresionó a la opinión pública mundial y provocó la exigencia de medidas de seguridad más severas.

La experiencia de los países industrializados ha puesto también sobre el tapete determinados puntos débiles de las actuales centrales nucleares, no del todo anticipadas en el momento de su diseño. Destaquemos los errores humanos, la degradación de los materiales, los accidentes producidos por pequeños fallos en cadena y la sensibilidad económica de los proyectos nucleares a la desorganización y la mala gestión. La identificación de estos problemas exige ahora de la energía nuclear una mayor seguridad y economía para que sea aceptable.

Algunos críticos atribuyen las limitaciones de esta industria al reactor de agua ligera (RAL), que es el diseño empleado en todas las centrales de los Estados Unidos y en la mayoría de las del resto del mundo. Apoyan, asimismo, el desarrollo de diseños radicales que no utilicen agua como refrigerante. Otros analistas abogan por el progresivo perfeccionamiento del RAL hasta llegar a los diseños de reactores avanzados de agua ligera. El programa para desarrollar este tipo de reactores ha sido más amplio y vigoroso que los de otras técnicas, lo que se justifica parcialmente por la mayor experiencia en su funcionamiento.

Los problemas que atañen a la ingeniería de la energía nuclear son complicados, no obstante la sencillez de los principios básicos. Los reactores producen calor por la división de los núcleos de elementos fisibles como el uranio y el plutonio, empaquetados para su uso como combustible en forma de barras o bolas ("pellets"). La fisión comienza cuando un isótopo fisible absorbe un neutrón y se desintegra en elementos más ligeros, liberando energía en forma de fragmentos de fisión expulsados, rayos gamma y un torrente de neutrones energéticos. Estos estimulan la fisión de otros átomos, que liberan más neutrones en un proceso autoabastecido de reacción en cadena. Los reactores dominan la reacción en cadena mediante el control de la población de neutrones con barras de control que absorben neutrones y mediante la limitación de la energía cinética de éstos con materiales moderadores. El combustible, las barras de control y el moderador constituyen, en su conjunto, el núcleo del reactor. El fluido refrigerante en circulación extrae el calor liberado en la fisión para producir vapor, que a su vez hace girar las turbinas que mueven los generadores eléctricos. (Esta refrigeración debe continuar, aunque cese la reacción en cadena; de lo contrario, la desintegración de los productos de fisión radiactiva sobrecalentaría el núcleo, y derramaría su contenido.)

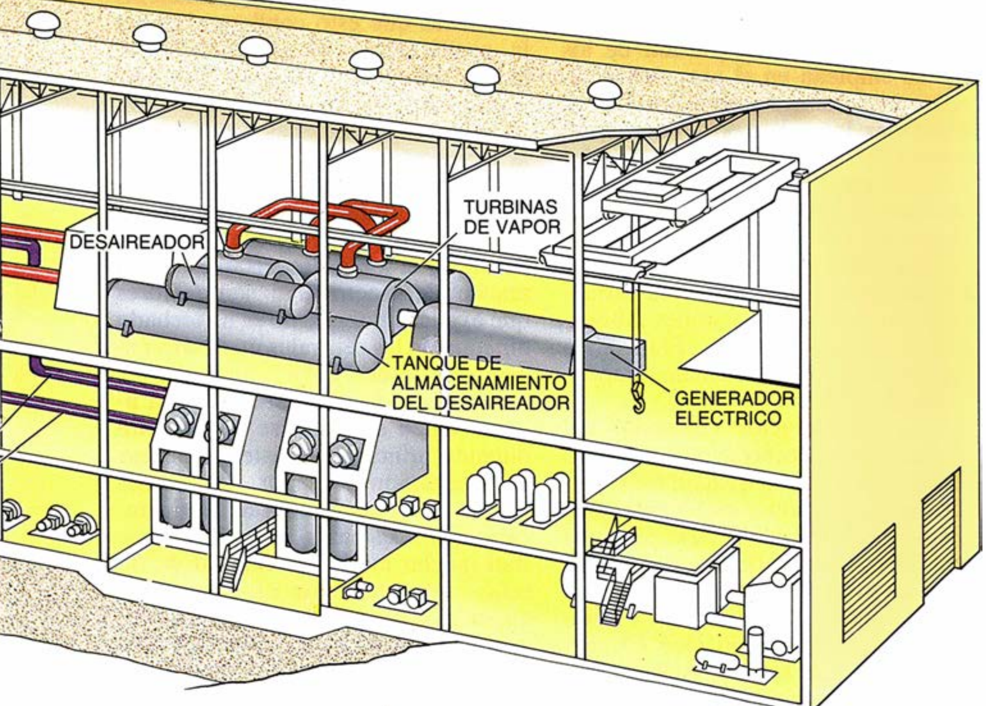
La experiencia acumulada a lo largo de casi cuarenta años ha fructificado en cuatro diseños básicos de reactor: el reactor de agua pesada (RAP), el reactor refrigerado por gas (RRG), el reactor refrigerado por metal líquido (RML) y el RAL.

En los reactores de agua pesada, el núcleo se refrigera y modera con agua "pesada", así denominada porque algunos de los átomos de hidrógeno se sustituyen por deuterio, un isótopo pesado, raro, del hidrógeno. El hecho de que estos reactores sean capaces de utilizar uranio natural (en el que el uranio 235, otro isótopo raro, y altamente fisible, no está concentrado) compensa el coste del deuterio.

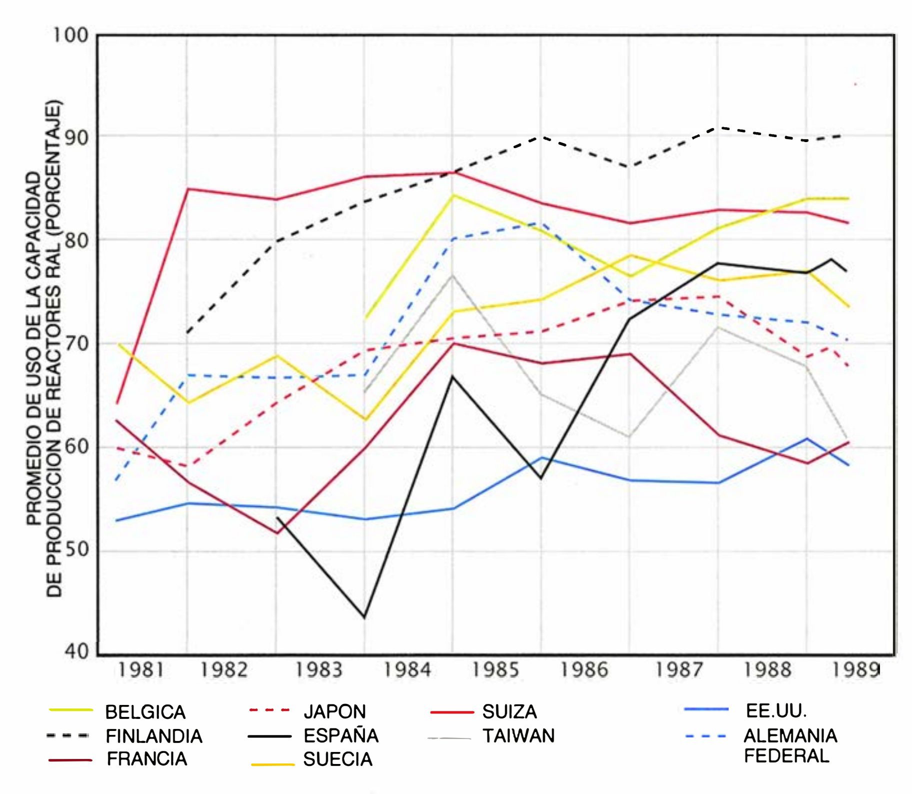
Los reactores refrigerados por gas se vienen fabricando desde 1956, al principio de la era de la energía nuclear civil. Su principal ventaja reside en su capacidad teórica para funcionar a temperaturas por encima de los 700 grados centígrados, notablemente mayor que los 330 y 550 que se alcanzan normalmente en los reactores RAL y RML, respectivamente. Debido a que las máquinas que transforman calor en otras formas de energía trabajan con mejor rendimiento a altas temperaturas, el reactor RRG convierte un 40 por ciento de su energía calorífica en electricidad, frente al 33 por ciento del reactor RAL. Aunque las industrias de energía nuclear de Gran Bretaña y Francia estaban basadas en versiones de esta técnica, los altos costes financieros y la baja fiabilidad asociada al RRG han llevado a que ambos países la abandonen en favor del RAL. La técnica de alta temperatura del RRG se ha investigado algo en los Estados Unidos y en la República Federal Alemana, donde los resultados de la misma han sido bastante desiguales.

Los reactores refrigerados con metal líquido, de función "nodriza", producen más combustible del que consumen, convirtiendo uranio 238 no fisible (más del 99 por ciento del uranio natural) en plutonio 239 fisible, que es combustible para el reactor. Porque los reactores nodriza consumen uranio con gran eficiencia, pueden proporcionar una sustancial independencia de energía eléctrica incluso a países sin recursos propios de uranio. Otra ventaja del RML estriba en la gran energía media de sus neutrones, que pueden inducir la fisión y promover la desintegración rápida de varios isótopos pesados. Recientes investigaciones señalan que los RML pueden ser muy útiles como incineradores de desechos nucleares.

El RML presenta dos inconvenientes. En primer lugar, el metal líquido refrigerante, generalmente sodio, reacciona con el aire y el agua; por eso requiere costosas medidas de seguridad en prevención de incendios y



desde el núcleo hasta los generadores de vapor. Las tuberías (*rojo*) que salen de la parte superior de los generadores llevan el vapor hasta las turbinas de la derecha; el agua condensada a partir del vapor usado retorna por tuberías paralelas (*morado*). Desde la sala de control se vigila la central.



2. DISTINTO RENDIMIENTO DE LAS CENTRALES RAL de un país industrializado a otro. Esa notable variación obedece a la diferente gestión de la central. La gráfica muestra el porcentaje de la capacidad que generan las centrales RAL utilizadas por las empresas eléctricas de 10 países. El resultado relativamente pobre de los Estados Unidos es sorprendente porque no se puede achacar a diferencias de equipamiento, normativa de seguridad o estructura de la industria nuclear. La causa reside en la gestión operativa de las centrales: aunque algunas rinden tanto como cualquier otra, el resto hace bajar el promedio nacional. Se ha mejorado en el número de paradas inesperadas.

explosiones químicas. En segundo lugar, el plutonio que se produce en estos reactores se puede utilizar para fabricar bombas atómicas. Hay quien teme que los reactores nodriza faciliten el tráfico internacional de plutonio, dando al traste con los esfuerzos en pro de la limitación de armas nucleares. La existencia de abundantes recursos nacionales de uranio y la oposición política a la proliferación nuclear han llevado a los Estados Unidos a confinar el RML en una instalación cerrada, que consume todo el plutonio producido sin otras prestaciones. Continúan impulsando esta técnica Japón, Francia, la República Federal Alemana, Gran Bretaña y la Unión Soviética, entre otros.

Los reactores de agua ligera, denominados así porque utilizan agua corriente como refrigerante y moderador, se subdividen en dos versiones: el reactor de agua en ebullición (RAE) y el reactor de agua a presión (RAP) [*véanse las figuras 3 y 4*]. El RAE tiene un ciclo térmico único; el núcleo calienta directamente el agua para producir vapor. El RAP consta de dos ciclos: uno emplea un circuito cerrado por el que circula agua presurizada (no entra, pues, en ebullición) para extraer calor del núcleo; el otro ciclo utiliza ese calor para producir vapor.

Aunque en el diseño de ciclo directo del RAE se necesitan menos grandes componentes de alta presión de los que se emplean en el RAP, deben tomarse importantes precauciones para apantallar las tuberías de vapor del reactor (en las que tiende a circular material radiactivo). El gasto suplementario equilibra más o menos el ahorro del RAE en maquinaria pesada. Ambos diseños son operativos y funcionan en todo el mundo industrializado, con distintas versiones fabricadas en Estados Unidos, Francia, la República Federal Alemana, Japón, Suecia y la Unión Soviética.

El primer reactor comercial del tipo RAL —una central que producía 68 megawatt de electricidad (MWe)— comenzó a funcionar en Shippingport (Pennsylvania) en 1957. Ha sido una de las centrales nucleares con mayor éxito de todas las construidas, ya que ha funcionado con seguridad y fiabilidad durante más de 30 años. (No parece sino que se le va a retirar el permiso, porque su edad y pequeño tamaño la hacen antieconómica.) La central se diseñó y construyó por la Westinghouse Electric Corporation en sólo 4 años; compárese ese lapso con los 10 o 14 años que requiere en los Estados Unidos la construcción de los reactores actuales que están a punto de terminarse. Otros países industrializados tardan unos siete años en realizar el mismo trabajo.

Los reactores de agua ligera se asignaron, en un comienzo, al programa norteamericano de submarinos. Desde entonces se han convertido en una pieza más de las centrales de energía nuclear. Tres contratistas —Combustion Engineering, Inc., Babcock and Wilcox Corporation y Westinghouse— han desarrollado sus propias versiones del RAP para su uso comercial a gran escala. La General Electric Company desarrolló el RAE. Durante los años cincuenta y sesenta varias compañías construyeron centrales con reactores de agua ligera en sociedades que compartían riesgos con el gobierno federal y las empresas eléctricas.

Más tarde, en su empeño por asentar un mercado para la energía nuclear, diversas empresas ofrecieron contratos "llave en mano" a sus clientes, en virtud de los cuales se entregaban centrales listas para funcionar a un precio atractivo, determinado de antemano. La creciente demanda de centrales hizo innecesarias estas transacciones a finales de los sesenta, cuando las propias compañías eléctricas comenzaron a construir centrales (con capacidades de hasta 1250 MWe). La experiencia ha demostrado que algunas eléctricas no estaban preparadas para las cargas financieras y técnicas que esto conlleva. Fue tal la proliferación de proyectos, que puede decirse sin exagerar que hay tantos modelos como centrales. Difícilmente cabe entonces aprender de la experiencia ajena, ni resulta fácil dictar una normativa uniforme en materia de seguridad. El encarecimiento de los costes, la creciente oposición política y el lento despertar de la demanda de electricidad son factores que explican por qué no se ha techado ninguna de las centrales nucleares encargadas desde 1974.

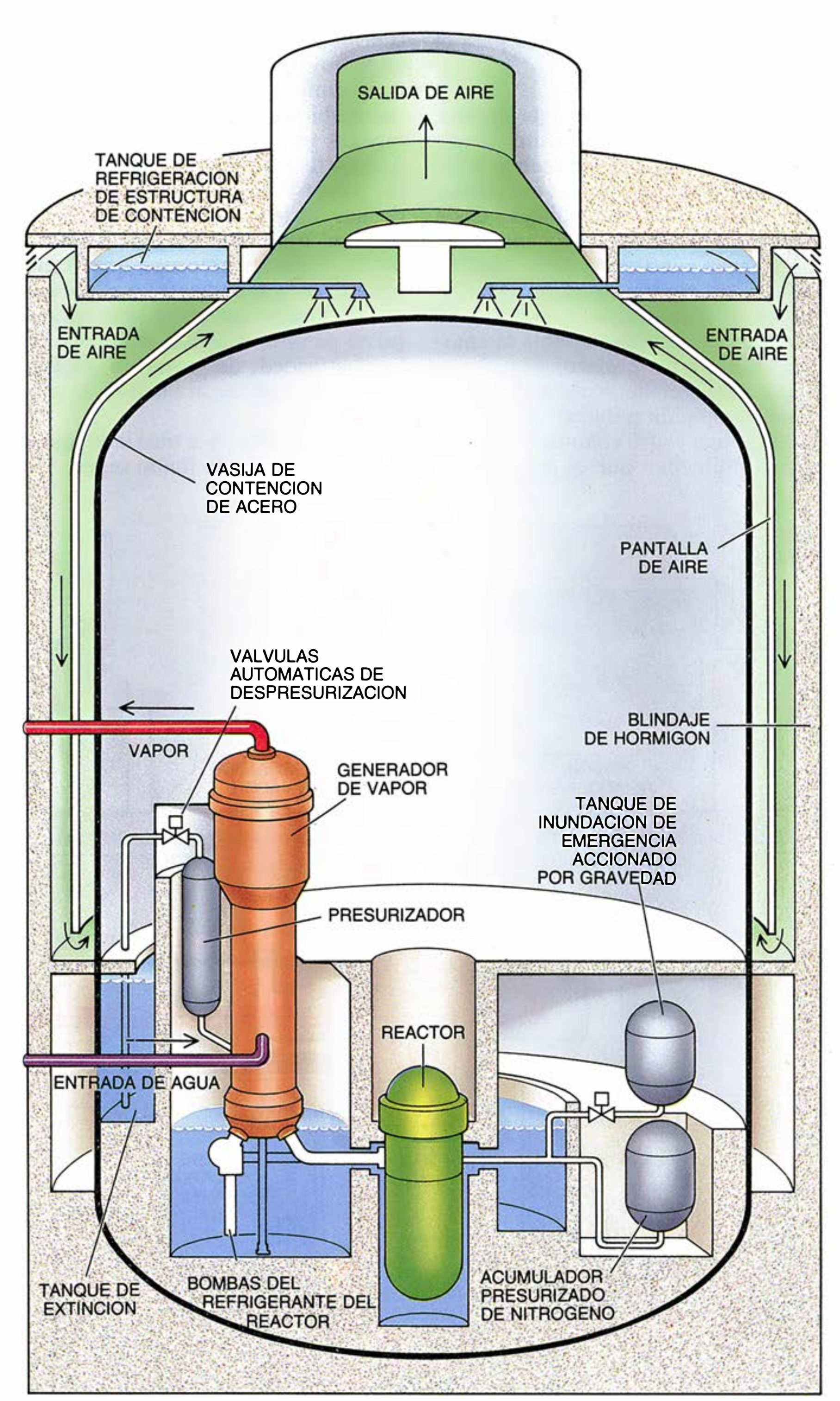
Con todo, los reactores de agua ligera vienen a parecerse en su componente principal: el sistema nuclear de producción de vapor, que consta del reactor y su sistema de refrigeración. (Los sistemas secundarios varían mucho más.) Similaridad de diseños del sistema de producción de vapor que no sólo se da en los proyectos estadounidenses, sino también en los japoneses y de la Comunidad Europea, por la sencilla razón de que éstos han comprado la técnica directamente en los Estados Unidos o indirectamente a través de licencias ex-

tranjeras y luego se han convertido en entes autónomos. La nuclear es una de tantas técnicas que, creadas en Norteamérica, se exportaron a otras naciones que hoy le hacen la competencia.

Llama la atención el hecho de que las centrales RAL hayan suministrado electricidad al mercado de los Estados Unidos en una proporción menor, en relación al tiempo de funcionamiento, que la aportada en otros países [*véase la figura 2*]. Un estudio realizado en 1986, en el que participaba uno de los autores (Golay), encontró que la disparidad obedecía a la diferente dirección y grado de profesionalidad de cada central, más que a razones de estructura política o industrial. Algunas de las centrales estadounidenses funcionaban tan bien como cualquiera, pero otras operaban tan mal que hacían bajar el promedio. Una clara anticipación a los problemas y el cuidado de los detalles constituye, así parece, la clave para el buen rendimiento de una central. Para el éxito de la energía nuclear, importa tanto la gestión adecuada como el diseño de la central.

Cada prototipo de reactor tiene su historial de éxitos y fracasos [*véase la figura 5*]. La mayoría de los fallos se producen por errores humanos o por fenómenos sutiles que eran difíciles de prever; muy pocas averías pueden atribuirse a defectos fundamentales del proyecto. No es correcto, pues, predecir el porvenir de una técnica tomando como referencia sus dificultades iniciales; estas dificultades han de contemplarse como algo a superar. Hyman Rickover, que fue almirante y experto en submarinos nucleares, comentaba que los modelos de reactor más atrayentes eran los que todavía no se habían construido. Los errores ocultos sólo se hacen evidentes a posteriori.

En nuestra opinión, todos los tipos de reactor tienen su sentido y su cabida. Poseen virtudes complementarias, aunque se llevan la palma los reactores de agua ligera. Los refrigerados por gas suministran calor a alta temperatura y prevén mejorar en simplicidad, seguridad y economía de combustible; los refrigerados por metal líquido pueden reproducir combustible, quizá quemar residuos nucleares y consolidar la seguridad. Estas promesas de los RRG y RML seguirán en el aire mientras no se disponga de una experiencia real de su funcionamiento. La prudencia aconseja progresar simultáneamente en los tres frentes: los reactores avanzados de agua ligera se podrían comenzar inmediatamente, mientras que los de



3. PROYECTO DE REACTOR DE AGUA A PRESION que incorpora dispositivos semipasivos de seguridad; éstos funcionan con pocas partes móviles y apenas intervención humana. En este diseño se coloca al reactor en el fondo de un edificio de contención para que el agua de refrigeración impulsada por la gravedad cubra de modo permanente su núcleo. Por encima de cierto umbral de presión, se abren las válvulas de despresurización en el generador de vapor, para dejar entrar vapor en el tanque de extinción donde se condensa en agua. Las paredes de acero de 4,5 centímetros de espesor de la vasija de contención encierran un espacio mucho mayor con relación a la potencia del reactor, comparado con las centrales convencionales; esta vasija puede resistir por tanto una acumulación prolongada de presión. Unas paredes de hormigón de 30 centímetros de espesor protegen al reactor de desastres naturales. Si ocurriera un accidente, una doble pared formada por un deflector de aire hecho de acero actuaría a modo de chimenea, a través de la cual puede circular el aire por convección natural. Estas corrientes, junto con la evaporación del agua que cae por gravedad desde unos dispositivos de rociado automático colocados en la parte superior, refrigeran la vasija y reducen la presión en su interior, evitando la rotura de la estructura de contención por la que podrían salir materiales radiactivos. El esquema, como en la figura 1, está basado en un diseño de Westinghouse.

tipo RRG o RML estarían listos para el próximo siglo.

¿Cómo puede la energía nuclear satisfacer los requisitos divergentes en materia de economía y seguridad defendidos por las compañías eléctricas y la opinión pública? Cada una de las partes está preocupada por las mismas cuestiones, pero pone el énfasis en puntos distintos. Mutuamente se descalifican y ninguna de ellas considera indispensable la energía nuclear a corto plazo.

¿Qué quieren las compañías? ¿Qué desea la opinión pública? ¿Cómo armonizar una y otra voluntad? Las empresas pretenden que el proyecto de central nuclear sea de interés económico hoy y durante toda la vida útil de la central. Temen que se produzca un cambio en la normativa legal (por razones genuinas de seguridad o por presión de la opinión pública), lo que les puede obligar a la remodelación de sus instalaciones, con un coste enorme, o a cerrarlas definitivamente. También les preocupa que el ministerio correspondiente, o el gobierno, les impida recuperar su inversión (al no permitir la subida del precio de la electricidad, desgravación, etcétera) si la central costara más de lo presupuestado.

El consumidor, por otro lado, quiere un suministro de fluido seguro y a un precio aceptable, pero no se pone de acuerdo sobre las medidas de seguridad exigibles. Algunos sectores piden que la probabilidad de un accidente en la central, durante toda su vida, sea mínima; otros solicitan que sea teóricamente imposible que ocurra ningún tipo de accidente, exigencia de todo punto utópica.

Se trata de un debate en el que intervienen valores que no se pueden reducir por pura lógica a unidades corrientes (de dinero o incluso de vidas humanas); no se puede dirimir con argumentos cuantitativos. Sin embargo, podemos intentar analizar la seguridad de la misma forma racional que se hace con los costes, aplicando lo que se conoce como valoración probabilística del riesgo (VPR). Esta técnica, desarrollada en la industria aeroespacial, estima la probabilidad y la gravedad de cada uno de los posibles accidentes. La información obtenida se incorpora en el borrador preliminar del proyecto de una central, se aplica la VPR al nuevo diseño y se repite el proceso hasta que se alcanzan los objetivos que reducen el riesgo hasta un límite aceptable. Estos objetivos se ponderan en función de la probabilidad estimada para cada posible accidente multiplicada por la gravedad de sus consecuencias. La cadena de posibles incidentes que se producen por el fallo de cualquier componente —juntas del circuito de refrigeración, válvulas de presión, dispositivos automáticos de control, etcétera— se puede prever conociendo el diseño de la central. Los resultados de la VPR, sin embargo, están limitados por las incertidumbres de los datos y por la imprevisión del comportamiento humano y de ciertos fenómenos físicos. No obstante, la propia aplicación de este método sugerirá a veces formas sencillas de reducir los riesgos. Una de ellas consiste en incorporar medidas "pasivas" de seguridad, que se basan en la gravedad o la convección natural, en lugar de elementos "activos", como bombas. Los sistemas semipasivos atienden sólo a ciertos dispositivos activos —las válvulas, por ejemplo.

Conviene resaltar que la reducción de riesgos suele beneficiar a la empresa propietaria incluso más que a la población, porque es mucho más probable que un accidente produzca daños económicos en una central que desgracias personales en sus cercanías. El accidente de Three Mile Island, por ejemplo, provocó el cierre de la central pero no causó daños a la población.

Para que una central nuclear suministre energía eléctrica barata y segura al mismo tiempo, debe cumplir

VENTILACION
PISCINA DE REFRIGERACION
CONDENSADOR DE VAPOR
VAPOR
PISCINA DE EXTINCION
ENTRADA DE AGUA
LINEA DE DESCARGA PARA SEGURIDAD
VASIJA DE PRESION DEL REACTOR
BARRAS DE CONTROL
LIMITE DE LA CONTENCION DE HORMIGON

4. MAQUETA DE REACTOR SIMPLIFICADO DE AGUA EN EBULLICION (RAES); ciñe el núcleo con tres estructuras concéntricas: la vasija de presión del reactor, en la que el calor del reactor provoca la ebullición directa del agua convirtiéndola en vapor; una cámara de hormigón (*resaltada en negro*) y una piscina de agua, que retiene y enfría el vapor expulsado por el reactor en una emergencia; y, por último, un edificio de hormigón, que sirve de blindaje y segunda vasija de contención. La presión excesiva en el reactor abre automáticamente unas válvulas que liberan el vapor en una piscina de extinción, aligerando la presión. Si es necesario, el agua de esta piscina puede fluir hacia abajo para refrigerar el núcleo. La acumulación de presión en la estructura de contención está limitada por la refrigeración que proviene de la evaporación del agua de una piscina situada en la parte superior del edificio de contención. La ilustración se basa en un diseño de General Electric.

muchos requisitos interrelacionados: construcción, mantenimiento y repostaje económicos; larga vida y funcionamiento estable, refrigeración y parada fiables. Los objetivos de seguridad y rendimiento no entran en conflicto durante la etapa de diseño mientras no se lleven más allá de los límites aceptables; a partir de ahí, la mejora en alguno de los campos se obtiene generalmente a expensas del otro. Llegados a ese punto, los diseñadores maximizan un factor sin comprometer los otros hasta un grado inaceptable.

REACTORES DE AGUA LIGERA

EXITOS: centrales de Francia, Suiza, República Federal Alemana, Japón, Suecia, Finlandia, Corea y la mayoría de las centrales de los Estados Unidos.

FIASCOS ECONOMICOS: Midland, Michigan; Zimmer, Ohio; Rancho Seco, California; Marble Hill, Indiana; Shoreham, Long Island.

FALLOS DE SEGURIDAD: Three Mile Island 2, Pennsylvania.

REACTORES REFRIGERADOS POR METAL LIQUIDO

EXITOS: Phenix, Francia; Dounreay, G.B.; Instalación de Prueba de Flujo Rápido, Washington; Reactor Experimental Reproductor II, Idaho.

FIASCOS ECONOMICOS: SNR 300, República Federal Alemana.

FALLOS DE SEGURIDAD: Fermi I, Michigan; Reactor Experimental Reproductor I, Idaho.

REACTORES REFRIGERADOS POR GAS

EXITOS: Peach Bottom, Pennsylvania; AVR, República Federal Alemana.

FIASCOS ECONOMICOS: Fort St. Vrain, Colorado; el programa de reactores de gas en Francia y Gran Bretaña; Reactor de Torio de Alta Temperatura, República Federal Alemana.

FALLO DE SEGURIDAD: Windscale, G.B.

5. EXITOS Y FRACASOS de los principales prototipos de reactor. La central se convierte en fiasco económico cuando requiere una inversión desmesurada o suministra energía de modo tan discontinuo que no vale la pena que funcione; por fallo de seguridad nos referimos a un accidente que acaba con su funcionamiento. Three Mile Island 2, por ejemplo, entra en el apartado de "fallos de seguridad" porque a raíz del accidente de 1979 se le retiró el permiso de explotación. La central de Shoreham, en Long Island, ha sido otro fiasco económico porque las autoridades impiden recuperar la inversión.

Enseña la historia que se han primado los objetivos económicos, acompañados por una seria preocupación por la seguridad. Esta estrategia se sigue en Japón, donde el Ministerio de Comercio Internacional e Industria (MITI) ha apoyado dos nuevos prototipos: el RAP avanzado (RAPA), creado por Westinghouse, y el RAE avanzado (RAEA), modelo de General Electric. Se espera de ambos diseños mejoras significativas en el rendimiento del consumo de combustible y apreciables reducciones en los costes de inversión y funcionamiento. La Compañía de Energía Eléctrica de Tokyo confía en recibir permiso de construcción para el primer RAEA del mundo en 1991.

El núcleo del RAPA dura más y posee mayor volumen que el del RAP convencional, lo que redunda en una menor pérdida de disponibilidad de energía cuando se apaga la central para repostar. La utilización de avanzados generadores de vapor promete también un largo período de funcionamiento. Se han simplificado bastante, asimismo, las señales eléctricas que controlan y accionan los componentes de la central. La maraña de cables de cobre que veíamos en los reactores antiguos se ha sustituido por un sistema compacto multiplexado de fibra óptica. Los dispositivos automáticos mecánicos y electrónicos han reemplazado la intervención humana en muchas operaciones de emergencia. Se ha mejorado la fiabilidad gracias a un diseño que sigue criterios más restrictivos en cuanto a cargas mecánicas y temperatura.

El RAEA comparte muchas innovaciones de control incorporadas en el RAPA. A diferencia del RAE convencional, el modelo avanzado se distingue porque el agua recorre un circuito cerrado de tuberías dentro del reactor, evitándose de esta manera las tuberías externas, que son menos seguras. La energía del reactor se controla modificando el volumen de las burbujas del agua que hay dentro del núcleo, regulándose con ello el grado de moderación con que el agua frena la reacción en cadena. Los sistemas de control, de acción electromecánica y no hidráulica, ahorran mantenimiento. Los sistemas de seguridad son redundantes (hay más sistemas preparados por si falla el principal) y requieren menos atención por parte de los empleados de la central.

En los Estados Unidos, los esfuerzos que se dedican a la creación de reactores de agua ligera aún más avanzados cubren un radio mayor que los empeñados por Japón, aunque son menos firmes. Participan en esa tarea el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI), que es la oficina de investigación de las industrias eléctricas de los Estados Unidos, el Departamento de Energía, Combustion Engineering, Inc., Westinghouse y General Electric. Centran sus esfuerzos en diseños que supongan un cambio evolutivo y cuenten con medidas semipasivas de seguridad, lo que también ha conducido a la definición de los correspondientes requisitos para el funcionamiento de la central. Se ha concedido la máxima prioridad a la obtención de la aprobación total por la Comisión Reguladora Nuclear de cualquier diseño antes de comenzar su construcción para no comprometer el riesgo financiero que implica.

Francia ha desarrollado un prototipo de RAP avanzado y progresivo. Denominado N4, tiene una capacidad de 1450 MWe, mayor que cualquier otro reactor de agua ligera. Utiliza la automatización para reducir la posibilidad de errores humanos y para consolidar la fiabilidad de la refrigeración del núcleo. También incorpora un filtro en el edificio de contención para atrapar las emisiones radiactivas en caso de un accidente grave en el núcleo.

Varios programas centran su atención sobre la rentabilidad económica y la seguridad. En Gran Bretaña, el Consejo General de Producción Eléctrica (CEGB) ha comenzado un programa para sustituir el sistema nacional de reactores avanzados refrigerados por gas por reactores de agua a presión. La reciente privatización y disgregación del CEGB han detenido, en buena parte, el desarrollo del programa, menos en el caso de Sizewell B, central que está previsto terminar en 1994. Esta es la primera en el mundo que se diseña aplicando a fondo la valoración probabilística de riesgo. Entre las mejoras aportadas por esta técnica estadística están la separación física de los sistemas relacionados con la seguridad de los demás componentes, la multiplicación de la redundancia de los sistemas de seguridad, la reducción de la intervención humana en las primeras etapas de control de accidentes y la construcción de una doble pared de contención.

Se eliminan riesgos con la construcción de reactores más pequeños, que contengan menos material radiactivo y puedan, en principio, refrigerarse

ENFASIS SOBRE EL FACTOR ECONOMICO
Todos los reactores RAL Programas de grandes centrales (1200-1400 MWe) en Japón, Francia y EE.UU. Pequeños reactores RAP (200-600 MWe) montados en barcazas (EE.UU., Gran Bretaña, Francia y Alemania Federal)
INTENTOS PARA EQUILIBRAR LA SEGURIDAD Y LA ECONOMIA
Pequeños reactores RAP (600 MWe) (AP-600, Estados Unidos) Pequeños reactores RAE (600 MWe) (RAE5, Estados Unidos) Sizewell B (Gran Bretaña)
ENFASIS SOBRE LA SEGURIDAD
PIUS (reactor RAP, Suecia) PIUS (reactor RAE, Estados Unidos) ISER (reactor RAP, Japón) SIR (reactor RAP, Gran Bretaña y Estados Unidos)

6. NO HAY UNIDADES COMUNES DE MEDIDA para la seguridad y el rendimiento. Por tanto, debemos buscar su equilibrio en criterios subjetivos, como se ve en las tres estrategias básicas representadas por los diseños del cuadro superior. Los modelos que resaltan el rendimiento económico predominaron en los primeros desarrollos de los RAL porque ninguna otra estrategia podía crear un mercado para la nueva técnica. Los modelos que insisten en la seguridad no se han abierto camino comercial, en parte porque se les considera poco atractivos desde el punto de vista económico.

más fácilmente en caso de avería. Ofrecen incluso ventajas económicas. Las 54 compañías nucleares que hay en los Estados Unidos tienen sistemas con capacidades que van de 2000 a 32.000 MWe; cada unidad posee una capacidad de producción de alrededor de 1000 MWe (suficiente para satisfacer las necesidades de medio millón de hogares). Se aduce, en su contra, que constituyen unidades demasiado grandes: muchas compañías prefieren aumentar su capacidad con incrementos menores.

Queda por saber si los costes financieros de estos pequeños reactores son competitivos frente a equipos mayores, cuyo tamaño les permite disfrutar de cierto ahorro con una buena gestión. Hay razones para pensarlo. Se podrían construir pequeñas centrales en una fábrica y enviarlas hasta su destino por ferrocarril o barcaza (la mayoría de las nucleares se encuentran junto a cursos de agua o lagos para disponer de líquido suficiente en la refrigeración). Esta fabricación en serie suele ser más barata, más rápida y más precisa que la construcción a pie de obra. Antes, sin embargo, habrá que resolver el problema de allegar capital para la inversión inicial y el mantenimiento de esas factorías.

El EPRI ha promovido dos iniciativas para desarrollar reactores avanzados de agua ligera pequeños, con capacidades de 600 MWe o menos; una, bajo la dirección de General Electric, está desarrollando un RAE, y la otra a cargo de Westinghouse, que está desarrollando un RAP. Cada uno de los diseños propone centrales que se estabilizarán al cabo de tres días como máximo sin intervención de operarios, cuya seguridad descansa en sistemas semipasivos y con métodos de contención fuertemente reforzados para retener los materiales radiactivos, incluso en caso de accidente. Como ambos reactores tienen menos componentes que las centrales convencionales, su mantenimiento será más sencillo y menos probable la posibilidad de averías.

El RAE simplificado emplea sistemas semipasivos, como un depósito de agua colocado encima del núcleo para que caiga por gravedad al reactor sin necesidad de utilizar bombas, que podrían fallar. Otros elementos basados en la acción de la gravedad son un sistema de alta presión para la refrigeración del núcleo y un sistema que refrigera el edificio de contención por evaporación del agua de una piscina situada en la parte superior. Este diseño elimina la posibilidad de una avería en las bombas de recirculación fiando la recirculación en el núcleo a la convección natural.

En el modelo AP-600 [*véase la figura 1*] las medidas pasivas de seguridad incluyen una chimenea que refrigera el edificio de contención mediante una corriente de aire exterior (impulsado por la convección natural en vez de utilizar ventiladores). En caso de accidente, esta refrigeración, ayudada por aparatos de rociado automático que funcionan por la acción de la gravedad humedeciendo la parte superior del edificio de contención, alivia la presión del interior de la vasija del reactor, lo que disminuye la probabilidad de una ruptura de la estructura de contención. Un sistema pasivo de refrigeración más refinado situado a cierta altura emplea la presión hidrostática —el peso de una columna de agua— para forzar la entrada de agua en el núcleo en caso de una refrigeración de emergencia.

También se elimina la posibilidad de fugas de refrigerante utilizando bombas estancas.

El primer y más radical plan de seguridad pasiva está incorporado en el PIUS, prototipo de RAP diseñado en Suecia, que nunca ha llegado a construirse. Este diseño, que, de los posibles accidentes, toma en consideración unas consecuencias de mucho mayor alcance que las tenidas en cuenta por los prototipos de reactor expuestos en este artículo, especifica que la central ha de ser capaz de apagarse por sí misma y enfriarse automáticamente incluso en casos de sabotaje o puro abandono [véase "Nuevas estrategias para la energía nuclear", por Richard K. Lester, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1986]. El PIUS posee unas características peculiares; sólo produce 500 MWe y funciona a menor temperatura y presión de refrigerante que los actuales RAP. El reactor y el bucle primario de refrigeración están envueltos y comunicados con una piscina presurizada (contenida en una vasija de hormigón pretensado) de agua combinada con ácido bórico, que en caso de desastre no sólo absorbe calor, sino que se infiltra también en el bucle primario si la presión disminuye por fallo de algún componente. La convección natural hace circular entonces agua de la piscina a través del núcleo, donde el ácido bórico puede absorber neutrones, apagando el reactor, a la vez que lo refrigera. Sólo un fallo en la vasija de hormigón pretensado —lo que se considera muy improbable— podría desbaratar el funcionamiento de este sistema pasivo.

El principal inconveniente del PIUS podría estribar en su difícil mantenimiento y una apreciable tendencia a detenerse con facilidad. Pequeñas perturbaciones del sistema primario de refrigeración pueden producir paradas innecesarias. Cada vez que ocurre alguna, podría llevar como mínimo un día eliminar el boro del sistema primario para volver a encender la central. No sabemos todavía si tales preocupaciones están justificadas.

El desarrollo de las técnicas de reactores avanzados de los Estados Unidos vendrá condicionado por varios factores. En primer lugar, el país posee abundantes reservas de combustibles fósiles, carbón sobre todo, que le permiten resistir mejor una deficiente política tecnológica que otros países menos dotados. La energía nuclear, importante desde el punto de vista económico, no es de estrategia vital para los Estados Unidos. El interés de los reactores avanzados reside también, en la técnica que aporta para futuras necesidades energéticas y en su apoyo a una industria con potencial de exportación, capaz de reducir el déficit comercial e influir en las decisiones de política nuclear de otros países.

La mayoría de los programas nacionales de energía nuclear están en declive, proceso que coincide con la caída de la demanda de nuevas centrales. La capacidad industrial existente se hace entonces superflua, la inversión se retrae y menguan los recursos intelectuales y económicos para el desarrollo de tecnologías avanzadas. En los Estados Unidos este proceso se ha visto agravado por una financiación inadecuada y la falta de dirección.

En oleadas periódicas se presiona ante las autoridades federales para que encaucen los recursos nacionales hacia una o dos de las "mejores" técnicas de reactores. Sin embargo, al no existir un programa sólido que siente los criterios técnicos para decidirse por dicha opción, tal enfoque queda desvirtuado por dos razones: falta de acuerdo sobre los parámetros a considerar en las alternativas técnicas y la propia idea de selección, que constituye una maniobra de distracción de los problemas principales, y que no son otros que los detalles, las sutiles vulnerabilidades del sistema y el comportamiento.

Cada modelo de reactor nuclear tiene sus ventajas. Pero no podemos asegurar en este momento qué prototipo sería el mejor en condiciones futuras. En vez de restringir el número de opciones alternativas, el empeño en ese dominio debería ponerse en mantener muchas opciones técnicas entre las que se pueda escoger. La consolidada experiencia técnica del reactor de agua ligera convierte a éste en la principal opción a investigar a fondo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INTERNATIONAL COMPARISON OF LWR PERFORMANCE. K. Hansen, E. Beckjord, M. Golay, E. Gyftopoulos, R. Lester y D. Winje. MIT Energy Laboratory Report MIT-EL 87-004, febrero de 1987.

AP-600 OFFERS A SIMPLER WAY TO GREATER SAFETY, OPERABILITY AND MAINTAINABILITY. Ronald Vijuk y Howard Bruschi en *Nuclear Engineering International*, vol. 33, n.º 412, págs. 22-28; noviembre de 1988.

SIMPLICITY: THE KEY TO IMPROVED SAFETY, PERFORMANCE AND ECONOMICS. R. J. McCandless y J. R. Redding en *Nuclear Engineering International*, vol. 34, n.º 424, págs. 20-24; noviembre de 1989.



Formación de cráteres de impacto sobre la Tierra

La explosión del arsenal nuclear mundial no podría igualar la potencia que se libera cuando un meteorito kilométrico choca contra la Tierra. ¿Se alteró la evolución biológica y geológica con impactos de potencia semejante?

Richard A. F. Grieve

Durante los últimos mil millones de años, asteroides y cometas han chocado en multitud de ocasiones contra la Tierra, impulsando fragmentos a una velocidad 50 veces superior a la del sonido, volatilizando toneladas de roca sólida y excavando cráteres de muchos kilómetros de diámetro. Cada episodio duró escasos segundos, pero sus efectos se dejaron sentir a lo largo del curso de la historia biológica y geológica.

Aunque parezca inconcebible que la Tierra pueda ocultar episodios tan catastróficos, los investigadores deben buscar tenazmente señales de cráteres de impacto. En su mayoría, desaparecieron hace ya tiempo. Las fuerzas que erosionan las montañas, depositan sedimentos, producen erupciones de lava y mueven continentes, sirven también para destruir todo rastro de cráteres sobre la Tierra, a una velocidad mayor que la observada en cualquier otro planeta rocoso. Muchos de los cráteres de impacto que todavía persisten son inaccesibles por hallarse sumergidos en el océano. El estudio de los más de 120 cráteres conocidos ha posibilitado, sin embargo, idear técnicas para identificar otros, determinar las dimensiones del cuerpo que colisionó y cartografiar las etapas de formación de esas estructuras.

Información que ha sido de enorme valor para los geólogos empeñados en desentrañar la influencia del impacto de grandes cuerpos celestes sobre la evolución de la Tierra. ¿Pudo ésta, en su fase primitiva, chocar contra un objeto del tamaño de Marte y expulsar material suficiente para formar la Luna? ¿Sufrió la evolución de la vida un retraso por culpa del ingente número de objetos celestes que golpeó la Tierra hasta hace cuatro mil millones de años? ¿Condicionó el impacto de grandes asteroides o cometas, en tiempos más recientes, el medio y la biosfera, provocando extinciones en masa? El estudio reciente de esa craterización particular comienza a perfilar las líneas de respuesta.

RICHARD A. F. GRIEVE se halla adscrito al Servicio Geológico del Canadá. En 1970 se doctoró por la Universidad de Toronto. Durante su participación en el proyecto Apolo, comenzó a interesarse por los fenómenos de impactos terrestres. Hoy extiende ese estudio a los efectos de esas colisiones en la formación de la corteza de los planetas.

Hasta los años setenta, la mayoría de los geólogos consideraba que los cráteres de impacto constituían procesos de irrelevante interés. Algunos sostenían incluso que todos procedían de explosiones volcánicas. Más de un investigador, sin embargo, defendía con firmeza que la formación de los mismos desempeñó un papel importante en la evolución del planeta.

Daniel M. Barringer, ingeniero y empresario norteamericano, avanzó, en 1905, que cierta depresión del terreno, en el estado de Arizona, era el resultado del impacto de un gran meteorito férrico. Con semejante afirmación Barringer arriesgaba más que su reputación científica. Creía que, bajo el cráter, yacían enterrados varios millones de toneladas de meteorito férrico, que esperaba explotar comercialmente. Acertó en lo concerniente al origen del foso, denominado hoy en su honor cráter de Barringer y, también, cráter Meteor. Mas, para su infortunio y ambiciones comerciales, casi todos los restos del meteorito se habían destruido bajo las extremas presiones y temperaturas del golpe.

Dos décadas más tarde, el geólogo Walter H. Bucher estudió las formaciones rocosas de varios cráteres de los Estados Unidos. Aunque propuso que se habían originado en cierto tipo de explosión local, atribuía erróneamente la potencia explosiva a los volcanes. En 1936, John D. Boon y Claude C. Albritton Jr. admitieron ya que las estructuras investigadas por Bucher eran realmente cráteres de impacto. Hacia 1960, muchos investigadores, entre ellos Edward C. T. Chao y Eugene M. Shoemaker, ambos del Servicio Geológico, y Robert S. Dietz, del Instituto de Oceanografía, habían estudiado la geología de los cráteres con suficiente detalle como para reconocer pruebas claras de impacto. Identificaron, en particular, los efectos del metamorfismo de impacto, es decir, los cambios irreversibles producidos en las rocas por las altas presiones y temperaturas de una caída meteorítica.

El descubrimiento de los efectos del metamorfismo de impacto llevó a Carlyle S. Beals y a sus colaboradores, del Dominion Observatory de Canadá, y Wolfgang von Engelhardt, de la Universidad alemana de Tubinga, a la búsqueda sistemática de estructuras de impacto. Hacia 1970, con otros especialistas, habían descubierto ya más de 50 cráteres de ese tipo. A pesar de tales hallazgos, había todavía escépticos sobre el origen de dichas hendiduras.

Los geofísicos adscritos a las misiones Apolo resolvieron la cuestión, al examinar muestras lunares y determinar la velocidad de formación de cráteres en la Luna. La craterización lunar guarda estrecha relación con la de la Tierra, porque planeta y satélite

se han visto sometidos al mismo flujo de asteroides y cometas durante 4500 millones de años. En cierto sentido, la Luna muestra un mejor registro de la formación de cráteres terrestres que la misma Tierra; en efecto, aunque el campo gravitatorio de ésta captura más asteroides y cometas que la Luna, un cráter lunar se conserva, por término medio, un tiempo 100 veces más prolongado que sobre la Tierra. Cuando se dedujo la velocidad de craterización en la Luna, quedó demostrado, fuera de toda duda, que la formación de cráteres de impacto era allí un proceso común e importante y, por consecuencia lógica, también sobre la Tierra.

El estudio de cráteres lunares ofrecía sus limitaciones. Fue difícil establecer un nexo directo entre cada cráter lunar y las rocas acumuladas en su superficie. Las muestras habían salido arrojadas de su lugar de origen por uno o varios procesos de impacto. Cuando los geólogos reconocieron las limitaciones que condicionaban los estudios lunares, así como la importancia de esos episodios en la evolución planetaria, comenzaron a percibir la necesidad de investigar esa forma de craterización en la Tierra. El estudio de cráteres de impacto terrestres proporciona, además, el marco básico para contrastar los resultados de estudios, computacionales, experimentales y planetarios, de dicho proceso de craterización.

Hasta el momento se han descubierto más de 120 cráteres de impacto terrestres, número que crece cada año. Hoy realizan una búsqueda exhaustiva Viktor L. Masaitis, del Instituto de Investigación Geológica de



1. CRATER DE BARRINGER, que cubre una extensión de más de un kilómetro cuadrado del desierto de Arizona. Se formó hace unos 30.000 años, por el impacto de un meteorito férrico. Como la mayoría de los cráteres simples, consiste en una depresión en cuenco y un reborde elevado.

la Unión Soviética en Leningrado, Alexander T. Basilevsky, del Instituto Vernadsky de Moscú, y Vilen I. Feldman, de la Universidad M. V. Lomonosov de Moscú.

La edad de los cráteres de impacto sobre la Tierra oscila entre unos miles hasta casi dos mil millones de años. En su inmensa mayoría tienen menos de 200 millones de años, a pesar de que, según se evidencia en la Luna, su velocidad de generación se ha mantenido casi constante durante los últimos tres mil millones de años. Los cráteres antiguos abundan menos por la sencilla razón de que la erosión, la sedimentación y otros procesos geológicos los han destruido.

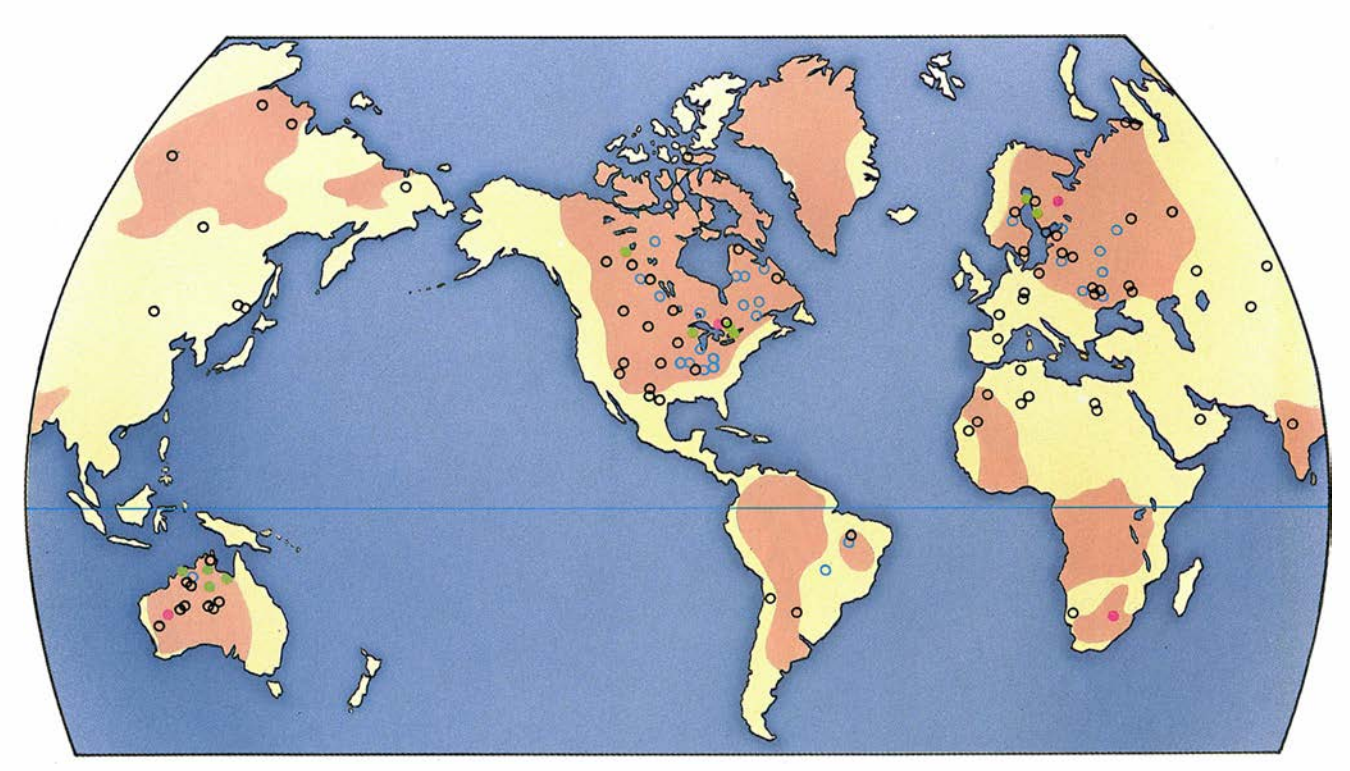
Además del sesgo temporal hacia estructuras más jóvenes, la destrucción de cráteres de impacto produce una irregular distribución geográfica. Unas dos terceras partes de los conocidos se localizan en los cratones, regiones que son los núcleos internos estables de los continentes. Los cratones experimentan bajas velocidades de erosión y de otros procesos destructivos; conservan, por tanto, los cráteres durante períodos más largos. (Hasta la fecha se han hallado más cráteres en los cratones de América del Norte, Europa y Australia que en los de América del Sur y Africa; el motivo es obvio: los programas nacionales de investigación de cráteres de impacto están más subvencionados en unos continentes que en otros.)

Se da por sentado que el 70 por ciento de los meteoritos caen en el océano. Sin embargo, el único impacto submarino descubierto se encuentra bajo aguas someras en la costa de Nueva Escocia. La estructura de Montagnais, así se la conoce, tiene 50 millones de años de edad y un diámetro de 60 kilómetros.

Las pruebas lunares y terrestres abonan la presunción de que se produzcan de uno a tres cráteres de más de 20 kilómetros cada millón de años. Los cráteres menores deberían colonizar la Tierra a una velocidad incluso mayor. Por tanto, si atendemos a la edad de la superficie de nuestra planeta y las velocidades de erosión, se puede estimar que quizá sólo el 10 por ciento de los cráteres mayores de 10 kilómetros y de menos de 100 millones de años de edad se han descubierto hasta el momento.

La craterización de impacto es un proceso geológico singular. Libera grandes cantidades de energía en un área pequeña durante un brevísimo intervalo. La magnitud de la energía liberada depende principalmente de la velocidad y el tamaño del cuerpo que choca contra la Tierra. Los asteroides la golpean a una velocidad media de 25 kilómetros por segundo (dos veces el cohete más veloz). Un cuerpo cuya masa rebase las 1000 toneladas atraviesa fugazmente la atmósfera, sin apenas obstáculos. Ahora bien, otro cuya masa no llegue a las 100 toneladas decelera a través de la atmósfera hasta un 50 por ciento de su velocidad original. A estas velocidades, hasta los meteoritos pequeños pueden transferir una energía cinética considerable al suelo. Esta energía se convierte en presión y calor. La presión ejercida sobre el meteorito y las rocas que reciben el golpe puede sobrepasar los 100 gigapascal (un millón de veces la presión atmosférica). Las temperaturas alcanzan varios miles de grados.

Esas condiciones extremas varían en función de la velocidad de choque y de la composición, tanto de la superficie que recibe el impacto como del meteorito. Los meteoritos más pequeños y lentos que golpean la Tierra acaban, simplemente, hechos añicos. Los mayores, sin embargo, generan calor y presión suficientes en el impacto como para que se fundan y volatilicen, además del cuerpo que choca contra la Tierra, algunas de las rocas terrestres que lo rodean. No es frecuente, pues, hallar trozos del objeto cerca de los grandes cráteres de impacto, a menos que un gran meteorito se fragmente durante su viaje a través de la atmósfera.



○ MENOS DE 200 MILLONES DE AÑOS
○ DE 200 A 400 MILLONES DE AÑOS
● DE 400 A 600 MILLONES DE AÑOS
● MAS DE 600 MILLONES DE AÑOS

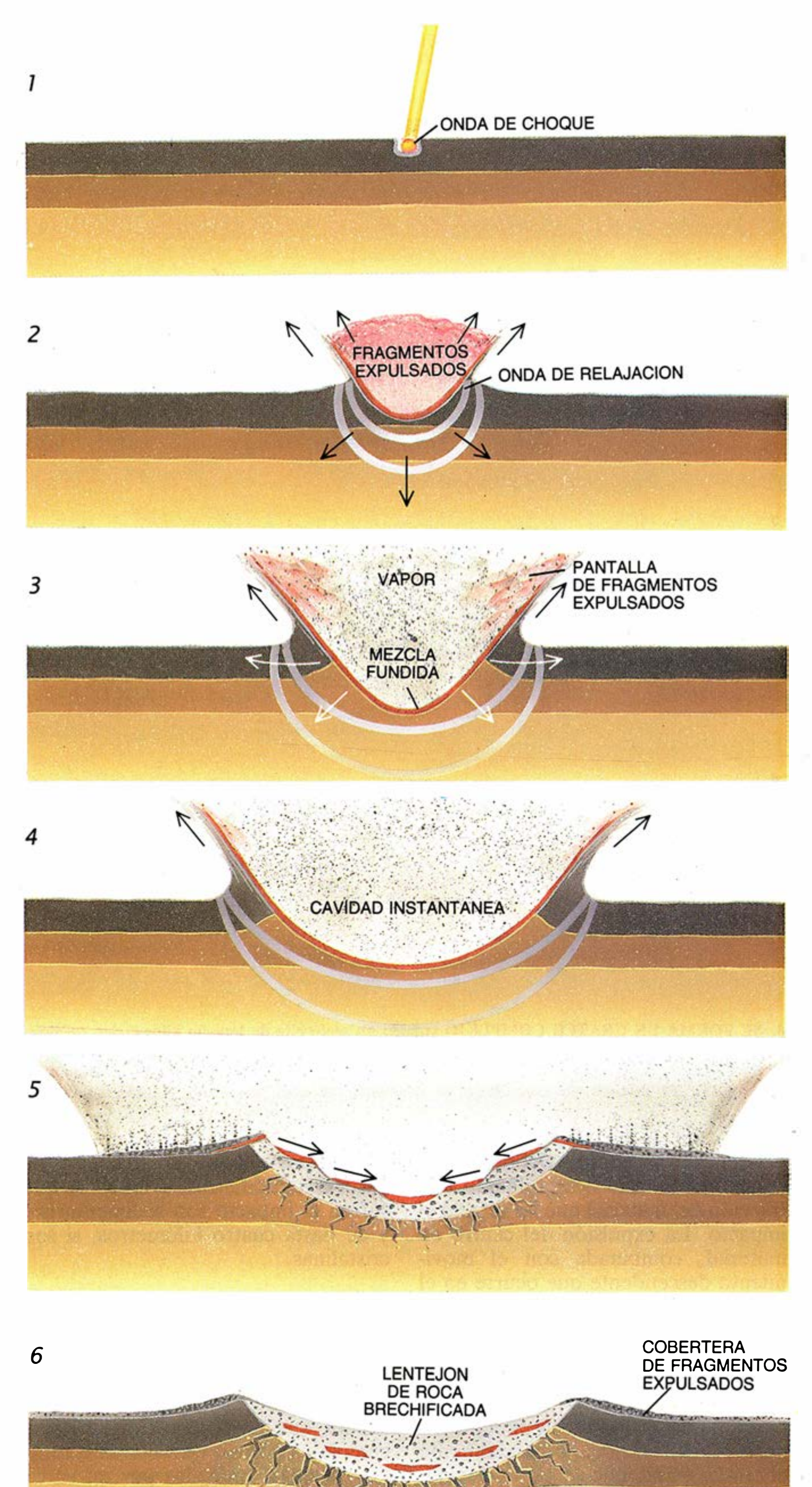
2. CASI TODOS LOS CRATERES DE IMPACTO de la Tierra tienen menos de 200 millones de años edad. Se encuentran en regiones estables llamadas cratones (*zonas sombreadas*). Quedan por descubrir mil cráteres más, tanto en tierra firme como en el fondo oceánico. (Dibujo de Ian Worpole.)

Los cráteres de impacto se agrupan en dos tipos básicos: simple y complejo. El ejemplo clásico de una estructura simple es el cráter de Barringer. Como otros de su especie, tiene forma de cuenco con un reborde elevado. El cráter de Barringer mide 1200 metros de diámetro, con una profundidad de 170 metros. Bajo su base aparente se encuentra un lentejón brechificado, es decir, de roca fracturada y mezclada. Este lentejón brechificado contiene rocas transformadas por las altas presiones y temperaturas del impacto, resultado del proceso de metamorfismo de impacto. La base del lentejón se encuentra a unos 380 metros por debajo de la máxima elevación del cráter, aproximadamente el doble de la distancia desde el suelo que se ve hasta el punto más elevado. Las rocas que rodean el lentejón brechificado están también fracturadas y muestran los efectos del metamorfismo de impacto, pero no se han desplazado mucho ni cambiado de orientación. Estas rocas constituyen las verdaderas paredes del cráter.

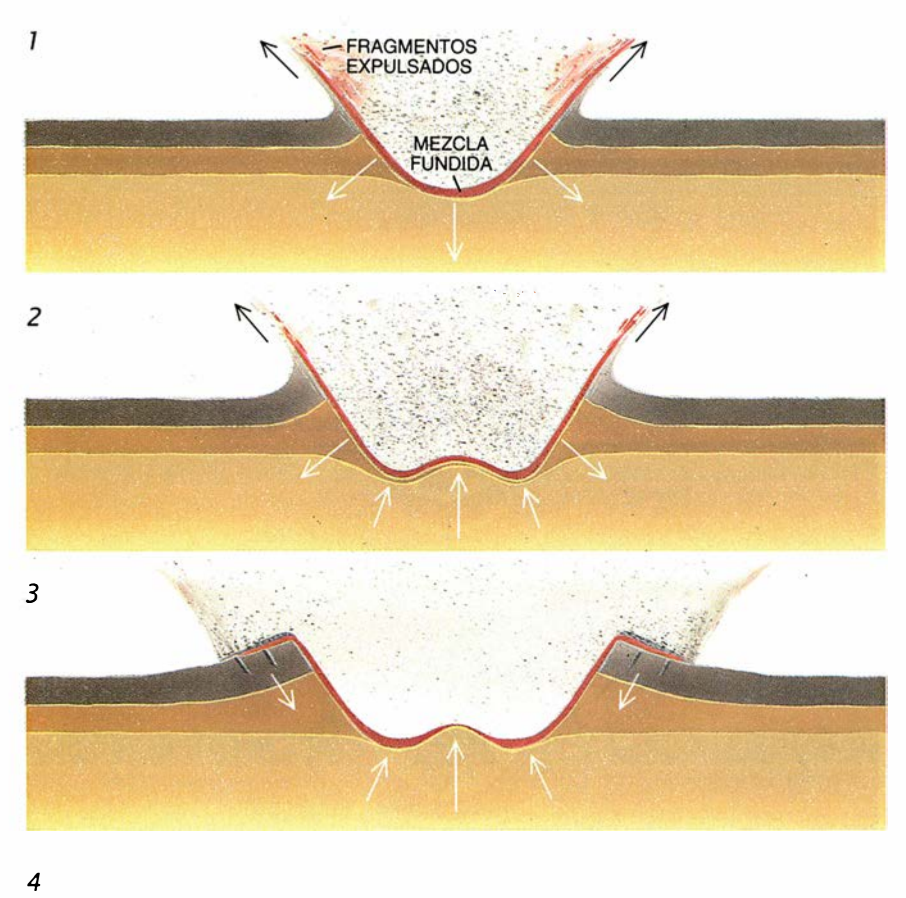
El proyectil que generó el cráter de Barringer fue un meteorito férrico, cuyo diámetro se estima en 60 metros y cuya masa era de un millón de toneladas métricas. Golpeó la Tierra a una velocidad de 15 kilómetros por segundo y liberó una energía cinética que se cifra en 10^{17} joule, cuantía equivalente a la energía liberada por la explosión de los ingenios nucleares más poderosos o por 20 millones de toneladas de TNT.

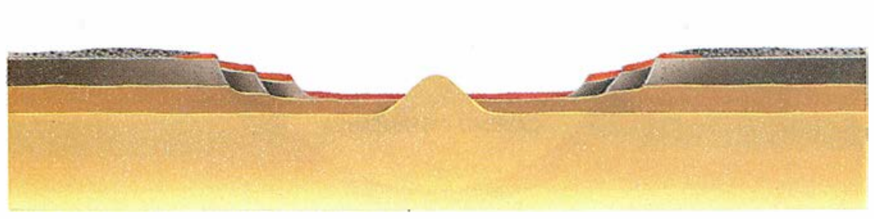
La transferencia de tamaña cantidad de energía cinética del meteorito a las rocas que sufren el impacto produce el cráter. La mayor parte de la energía se propaga en una onda de choque semiesférica que viaja por la roca [*véase la figura 3*]. La onda de choque comprime las rocas que reciben el golpe y las impulsa hacia abajo y hacia fuera del punto de colisión; y llega a acelerarlas hasta velocidades de varios kilómetros por segundo.

La onda de choque precede a la onda de relajación o enrarecimiento de las rocas agredidas. La onda de relajación, al igual que la de choque, empuja este material hacia abajo, en la dirección del punto de impacto. Allende esa región, la onda de relajación crea una dinámica más compleja. La onda de relajación alcanza los materiales que han sufrido el impacto y se mueven hacia abajo y fuera de la onda de choque. Cuando la onda de relajación interacciona con el material en movimiento, desvía parte del mismo hacia arriba y hacia fuera.



3. UN METEORITO de apenas cientos de metros de diámetro genera un cráter simple cuando colisiona con la Tierra (*1*). El impacto produce una onda de choque y una onda de relajación en el substrato rocoso (*2*). Estas ondas comprimen, funden, volatilizan y excavan las rocas. De esta manera, las ondas crean una cavidad que pronto alcanza su profundidad (*3*) y diámetro máximos (*4*). Las paredes de la cavidad colapsan hacia dentro (*5*), dejando un lentejón de roca brechificada (*6*).





4. SE FORMA UN CRATER COMPLEJO cuando un meteorito de tamaño kilométrico colisiona con la Tierra a velocidades cercanas a 30 kilómetros por segundo. El impacto volatiliza y funde la roca formando una cavidad (*1*). Las rocas afectadas rebotan hacia arriba (*2*) y elevan el fondo de la cavidad (*3*). El reborde de esta última se desploma entonces, creándose el cráter final (*4*).

Este proceso expulsa del centro del cráter que se está desarrollando una fracción del material que ha sufrido el impacto. La expulsión del centro de material, combinada con el movimiento descendente que ocurre en el centro, crea una cavidad transitoria, alineada con la roca fracturada que ha recibido el golpe. Roca que se colapsa hacia dentro, con la misma rapidez con que se ha formado la cavidad. Las paredes colapsadas crean un lentejón de brechas, que ocupa parcialmente el cráter simple que se ha producido.

El diámetro alcanzado por un cráter simple varía a tenor de la naturaleza de la roca golpeada. Los geólogos saben que el tamaño máximo guarda relación con la resistencia de la roca. No conocen, sin embargo, todos los factores que determinan el diámetro máximo de los cráteres simples. Estos ocupan un diámetro de hasta dos kilómetros, si las rocas que sufren el impacto son sedimentarias, y de hasta cuatro kilómetros, si son cristalinas.

Los cráteres de impacto terrestres cuyo diámetro supera los cuatro kilómetros presentan las estructuras características de los cráteres de tipo complejo. Llegan a ser cien veces más anchos que profundos. Los cráteres complejos poseen estructuras centrales elevadas, rodeadas por un surco anular y un reborde fracturado. Entre la estructura central y el reborde hay diferentes materiales, transformados por el impacto. Corresponden a rocas fundidas y brechificadas y a materiales receptores del impacto.

En su comienzo, el cráter complejo se acompasa a las pautas del simple. Mas, a medida que la cavidad instantánea empieza a crecer, parte de las rocas de su centro rebotan hacia arriba. El efecto de rebote eleva el fondo de la cavidad instantánea, formando un domo central. El levantamiento de la parte central de un cráter complejo supone, aproximadamente, la décima parte del cráter definitivo. Así, la elevación relacionada con el cráter de Manicouagan, de 100 kilómetros de anchura, se ha estimado en 10 kilómetros, una altura superior a la cuarta parte del espesor de la corteza continental.

La formación de un cráter complejo se asemeja al efecto producido por una gota de agua al caer en un estanque. Si se fotografía el estanque inmediatamente después de percutir aquélla la superficie, se observará el ascenso del agua en las proximidades del lugar del impacto, mientras se generan ondas alrededor del mismo, junto con una emulsión de pequeñas gotitas. Pero, mientras que la superficie del estanque torna a su lisura, las rocas fundidas por el impacto se solidifican en cierto momento, conservándose las estructuras dinámicas.

Resulta, a veces, difícil identificar un cráter de impacto, simple o complejo, por su sola estructura. La mayoría de los reconocidos como tales se han erosionado hasta formar en el terreno estructuras circulares difusas. Tan sólo los más recientes han conservado algo que evoque su forma primigenia. Incluso en este caso, las estructuras con apariencia de cráter de impacto pueden haberse producido por actividad volcánica u otro proceso geológico. Además, las rocas brechificadas no constituyen necesariamente una prueba del choque, ya que se encuentran en lugares diversos que no corresponden a cráteres de impacto.

La clave geológica para distinguir cráteres de impacto de otras formaciones geológicas es la presencia de efectos de metamorfismo de impacto. Por desgracia, las señales que podrían ayudarnos se hallan, en buena parte, ocultas en los cráteres simples, en el interior de los lentejones de brechas. De ahí que muchas estructuras circulares de hasta unos pocos kilómetros se supongan, a falta de pruebas convincentes, originadas por colisiones de ese tenor.

Es mucho más fácil confirmar un origen de impacto en los cráteres complejos que en los simples, ya que la elevación del centro del cráter permite observar las rocas transformadas por el choque. Los cráteres complejos, poco profundos, presentan es-

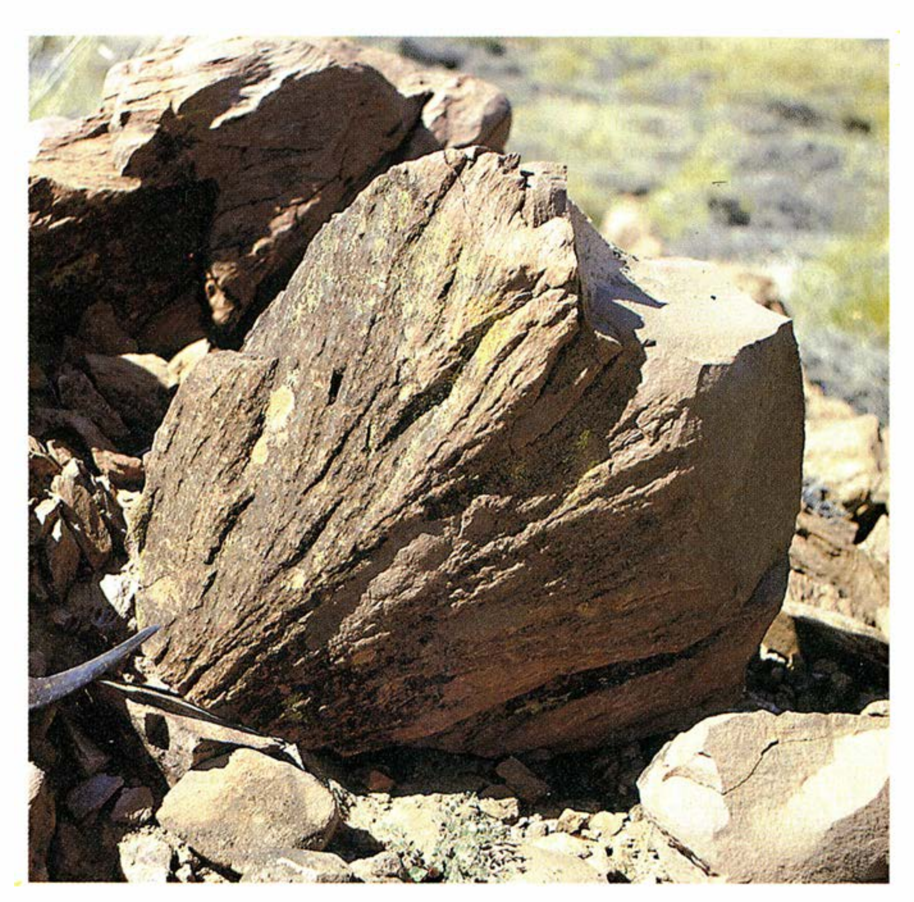
tructuras centrales elevadas y, por tanto, se prestan a confusión con otros tipos de formaciones. El aspecto insólito de los cráteres complejos indujo, antaño, a muchos investigadores a dudar de que este tipo se formara mediante el mismo proceso que los cráteres simples. Todavía en nuestros días leemos artículos científicos en los que se cuestiona el origen del impacto de tal o cual cráter complejo. Ocurre ello, sobre todo, con las estructuras mayores y más antiguas, como Sudbury, en Canadá, y Vredefort, en Sudáfrica; se les atribuye un diámetro original del orden de 150 a 200 kilómetros y se conviene en que han sufrido drásticas modificaciones durante casi 2000 millones de años.

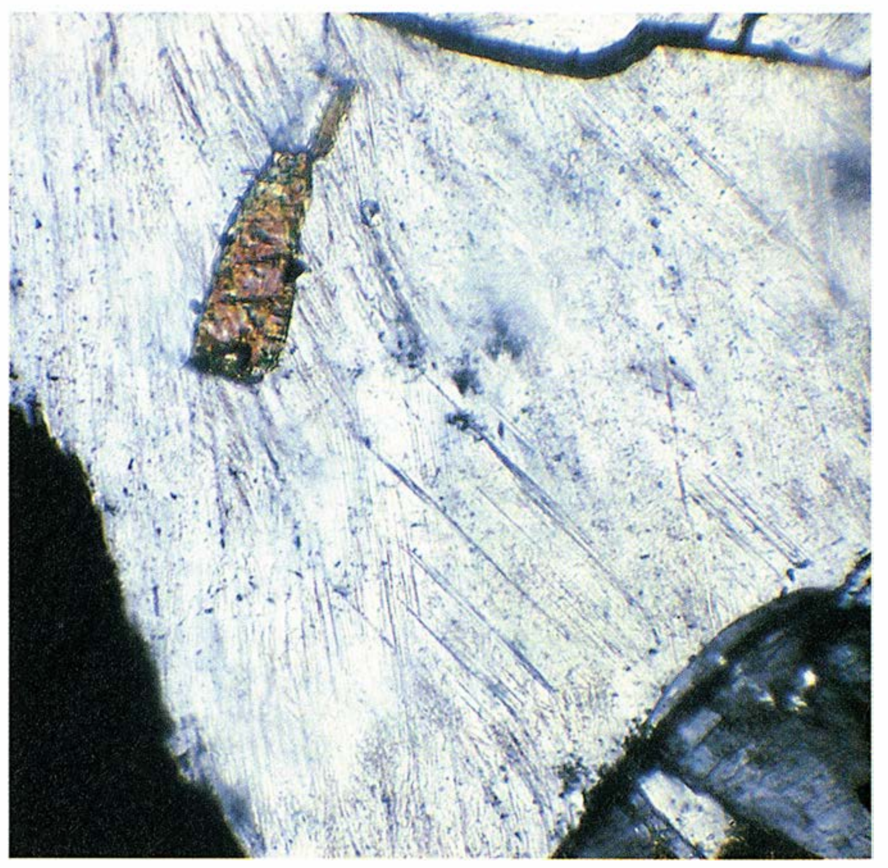
La craterización por impacto es el único proceso geológico conocido que produce efectos de metamorfismo de choque. Las rocas se transforman por aumento de presión y temperatura en el asentamiento, factores que también intervienen en el curso de la orogenia (formación de montañas). Mas las presiones ejercidas durante la orogenia son inferiores a un gigapascal y, las temperaturas, inferiores a 1000 grados. Los efectos de metamorfismo de impacto se dan a las mismas temperaturas, pero a presiones mucho mayores. Los efectos, que se dejan sentir ya a los 10 gigapascal, pueden producirse a centenares de gigapascal. Los efectos de metamorfismo de impacto no se han descubierto nunca en medios sometidos a un vulcanismo explosivo. Las presiones son simplemente demasiado bajas [*véase la figura 6*].

Es preciso admitir, sin embargo, que las temperaturas y las presiones registradas en las profundidades de la Tierra pueden igualar las necesarias para el metamorfismo de impacto. Pero las condiciones del interior del planeta no producen efectos de metamorfismo de impacto, porque se aplican durante millones de años. Esa clase de metamorfismo requiere la aplicación instantánea de altas presiones y temperaturas. Así, un meteorito que causara un cráter de impacto de unos tres kilómetros de diámetro generaría una compresión por choque durante sólo centésimas de segundo.

Se han observado muchas clases de efectos de metamorfismo de impacto en rocas y meteoritos lunares. Se han reproducido en el laboratorio y en explosiones nucleares de alta energía, experimentos que permiten discriminar entre los tipos de metamorfismo de impacto y entre las presiones requeridas para provocarlos.

El efecto de impacto más evidente





5. EFECTOS DEL METAMORFISMO DE IMPACTO causados por las altas presiones de choque que producen los meteoritos al impactar. Los fragmentos cónicos (*arriba*) se forman a presiones próximas a cinco gigapascal; a unos 10 gigapascal, los cristales de cuarzo (*abajo*) se fracturan por planos paralelos separados algunos micrometros. Estos efectos se denominan estructuras planares.

lo ofrece la aparición de fragmentos cónicos: rocas fracturadas de forma cónica y estriadas. Los fragmentos cónicos se producen con mayor facilidad en rocas de grano fino, como las calizas y las cuarcitas, sin apenas estructura interna. Se desarrollan preferentemente a presiones comprendidas entre 5 y 10 gigapascal.

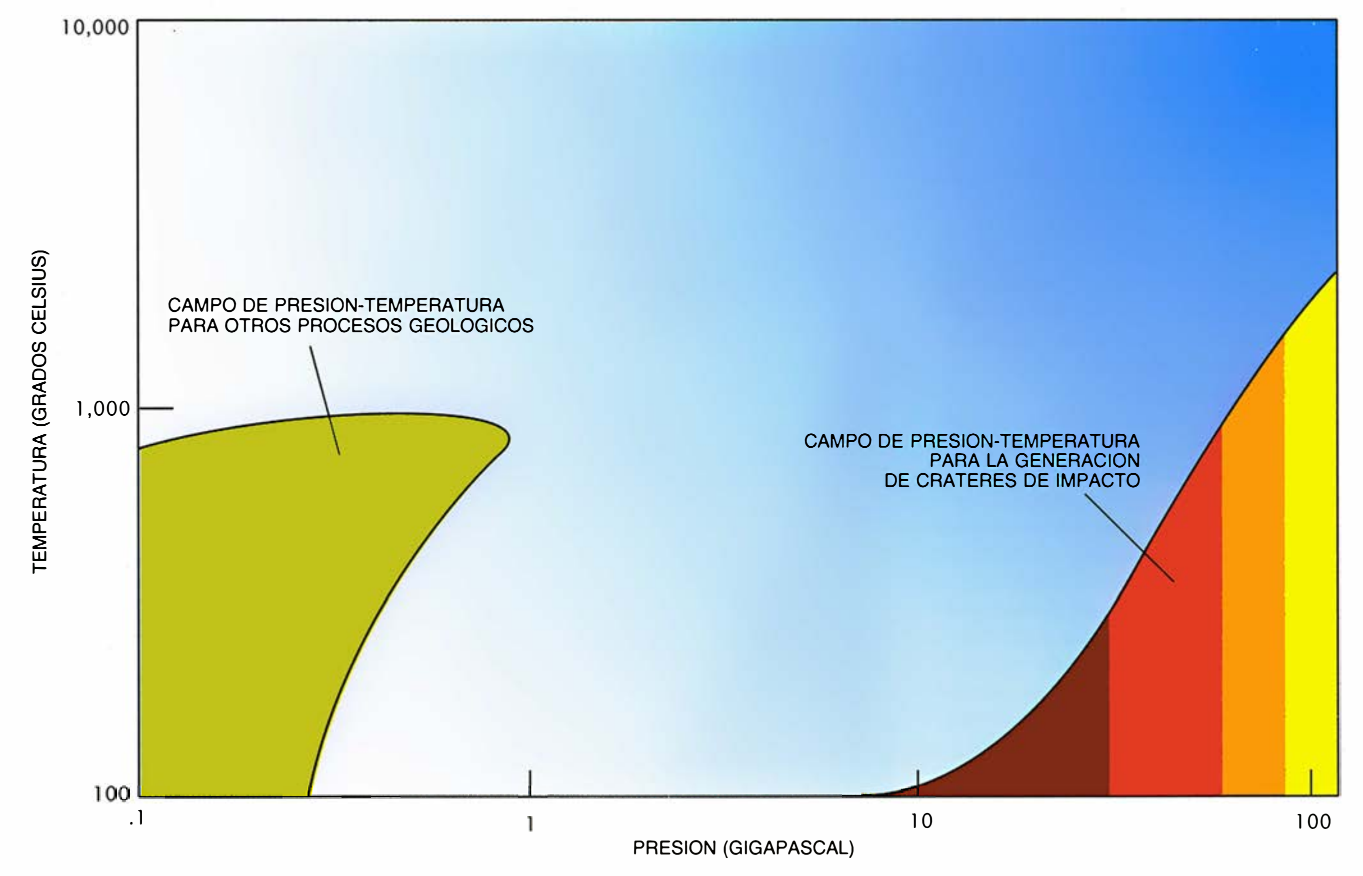
Con la excepción de los fragmentos cónicos, los demás indicadores diagnósticos del metamorfismo de impacto se aprecian en distintos minerales a escalas microscópicas. El efecto de choque quizá mejor documentado lo hallamos en cristales de cuarzo y feldespato. A presiones comprendidas entre 7,5 y 25 gigapascal, estos minerales se fracturan en planos paralelos, distantes unas pocas micras, y cuya orientación depende de la estructura cristalina. El número de planos y su orientación guardan relación directa con la presión del choque. Se puede, por tanto, deducir las presiones que crearon un espécimen comparando la muestra con un patrón de laboratorio.

El impacto puede también producir materiales de alta presión: diamante, a partir de carbono, y stishovita, a partir de cuarzo. La stishovita es un indicador muy preciso del metamorfismo de impacto. Se forma a unos 16 gigapascal. La stishovita puede generarse en el interior de la Tierra, a profundidades comprendidas entre 500 y 600 kilómetros; pero, muy inestable, se convierte de nuevo en cuarzo antes de llegar a la superficie; por este motivo, la que se encuentra en la superficie se ha formado aquí, y el único proceso conocido que produce las presiones requeridas es el impacto meteorítico.

A ciertas presiones de choque, un mineral pierde su estructura cristalina. Los minerales feldespáticos se desarticulan a los 30 gigapascal; el cuarzo, a los 40 gigapascal. Esas presiones transforman los minerales en los vidrios diaplécticos (del griego *diaplesso*, que significa "destruir mediante golpes"). Los vidrios diaplécticos difieren de los convencionales en que mantienen la forma y la composición global de los cristales originales; mas no presentan orden ni estructura a nivel atómico.

La mayoría de las rocas que han sufrido un impacto a 60 o más gigapascal se funden por completo. Cuando las tales se enfrían y cristalizan, forman vidrios y rocas fundidas por impacto. Observamos rocas fundidas por impacto en lentejones de brechas de los cráteres simples, en láminas anulares de los cráteres complejos y entre los fragmentos expulsados de los cráteres. Las rocas de fusión por impacto recuerdan las volcánicas, hasta el punto de que las rocas de fusión del cráter Manicouagan se las consideró, en un comienzo, rocas volcánicas.

Las rocas de fusión por impacto difieren, empero, de las rocas volcánicas en varios aspectos. Primero, aquéllas no se encuentran en ningún contexto de formas del terreno volcánicas comunes; segundo, tienden a encerrar grandes cantidades de fragmentos sin fundir procedentes del substrato local; tercero, carecen de bordes internos de enfriamiento y parecen proceder de una gigantesca emisión de lava. Por último, las rocas fundidas del impacto pueden presentar una composición química diferente de cualquier roca volcánica. En general, una roca de impacto es una mezcla química de varias rocas que han recibido el golpe y se han comprimido por encima de su punto de fusión; por contra, las volcánicas tienen composiciones determinadas por la fusión de ciertos minerales en condiciones de presión y temperatura



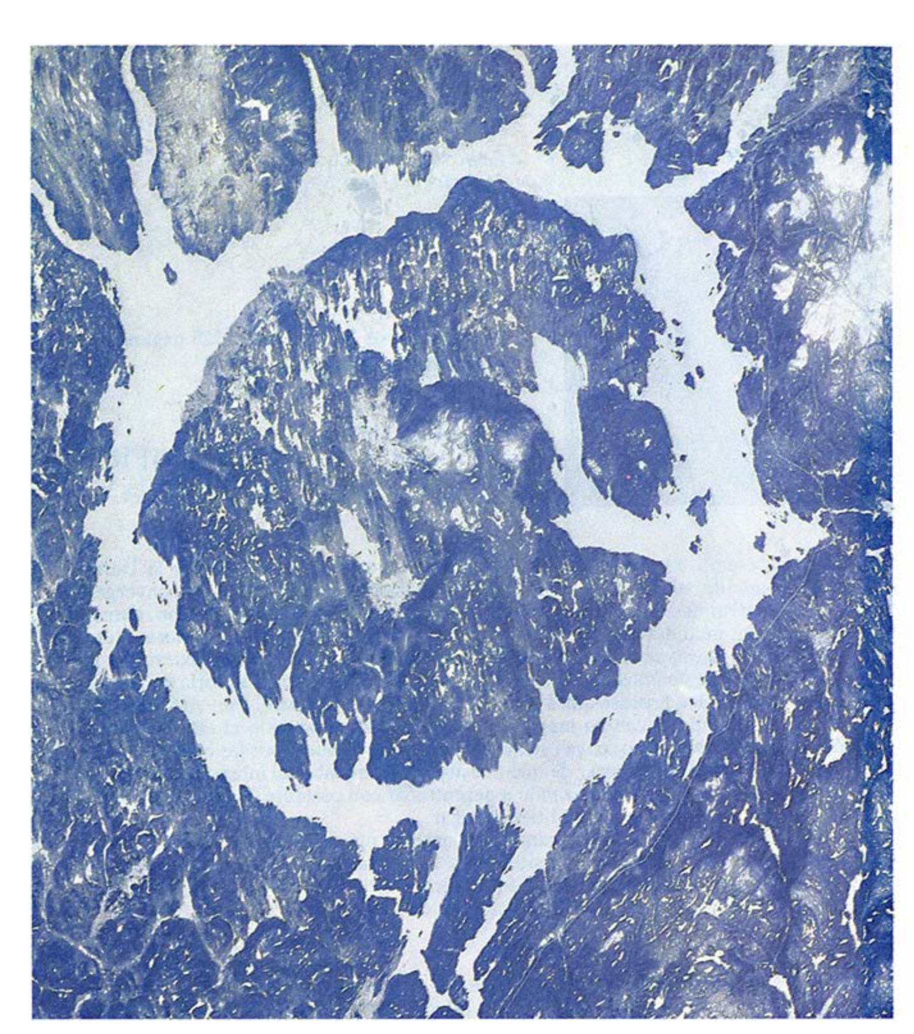
6. PRESIONES Y TEMPERATURAS producidas durante la generación de cráteres de impacto; son mucho mayores que las desarrolladas por otros procesos geológicos, como la actividad volcánica y los terremotos. Cuando la presión de impacto aumenta de 10 a 100 gigapascal, los cristales de los minerales crean estructuras planares (*marrón*), después degeneran en vidrios (*rojo*), se funden (*naranja*) y, finalmente, se volatilizan (*amarillo*).

que se hallan bajo la corteza terrestre.

Algunas rocas fundidas por impacto portan cantidades insólitas de ciertos elementos traza exclusivas del meteorito. Por ejemplo, la concentración de níquel en una roca fundida por impacto puede ser 20 veces mayor que en el substrato local. Es improbable que el níquel proceda del substrato o de una profundidad mayor. El níquel, el platino, el iridio y el cobalto, entre otros, existen en mayor concentración en los núcleos de hierro de los planetas que en sus cortezas, ya que emigran hacia el núcleo durante la formación del planeta. Por dicha razón, estos elementos se denominan siderófilos, que significa "amantes del hierro". Los siderófilos no abundan, pues, ni en las rocas volcánicas ni en otras rocas de la corteza terrestre. Pero eso no sucede en antiguos asteroides y cometas formados de manera independiente de los planetas. Por consiguiente, una alta concentración de elementos siderófilos en una roca fundida constituye un indicador excelente de un impacto meteorítico.

Las investigaciones sobre metamorfismo de choque y cráteres de impacto han planteado numerosas e interesantes hipótesis sobre la evolución de la Tierra. Quizás el caso más sugestivo y controvertido de impacto sea aquel en donde se han detectado los efectos del metamorfismo de impacto, pero cuyo cráter no ha aparecido. En 1980, un grupo de geofísicos, dirigido por Luis W. Alvarez, de la Universidad de California en Berkeley, estaba estudiando un estrato de arcilla en zonas de Italia, Dinamarca y Nueva Zelanda. El estrato de arcilla se había depositado en las postrimerías del Cretácico y principios del Terciario, hace 65 millones de años, intervalo en que se extinguió la mayoría de las especies vivientes. El grupo descubrió que la capa de arcilla contenía una concentración anómala, por alta, de elementos siderófilos. Dedujeron que los elementos procedían del impacto de un enorme meteorito, de unos 10 kilómetros de diámetro quizá. La energía liberada por ese evento se ha estimado en 10^{23} joule, que equivale a la explosión de 100 billones de toneladas de TNT, o a un millón de erupciones del monte Santa Helena. Alvarez y sus colaboradores propusieron que ese golpe violentísimo desestabilizó el equilibrio ecológico terrestre y produjo la extinción en masa.

La hipótesis ha sido cuestionada por muchos autores. Así, Charles B. Officer y Charles L. Drake, ambos



7. EL LAGO CIRCULAR de Quebec forma ahora parte del cráter complejo de 210 millones de años de edad llamado Manicouagan. El lago (helado y cubierto de nieve en la fotografía) mide 75 kilómetros de diámetro; según algunas estimaciones, el cráter tuvo una anchura de 100 kilómetros.

del Dartmouth College, apelan a otros mecanismos alternativos como el vulcanismo. No obstante, desde el hallazgo de Alvarez la anomalía siderófila del límite Cretácico-Terciario se ha confirmado en todo el mundo. También se han obtenido abundantes pruebas físicas de la hipótesis del impacto con el descubrimiento de minerales agredidos, en particular cuarzo y feldespato dotados de estructuras planares, en yacimientos del límite Cretácico-Terciario. Una objeción seria, por otro lado, contra la hipótesis del impacto reside en la ausencia de un cráter de las dimensiones (150-200 kilómetros) y la edad (65 millones de años) esperados. Todavía está por descubrir esa hondonada en tierra firme o en el océano. Quizá, como algunos han propuesto, no deberíamos esperar el hallazgo de ningún cráter grande, ya que el episodio Cretácico-Terciario se caracteriza por una lluvia de asteroides o cometas que produjeron muchos cráteres pequeños.

Se calcula que sucede un episodio de impacto comparable al supuesto Cretácico-Terciario cada 100 millones de años. Abundando en esa idea, algunos investigadores sospechan que otras extinciones en masa obedecieron también a impactos meteoríticos. Sospechas que, sin embargo, no están avaladas por datos químicos o físicos.

Partiendo de lo que probablemente sucedió durante el episodio Cretácico-Terciario, otros investigadores han sugerido que una tasa elevada de formación de cráteres impediría una evolución biológica precoz en la Tierra. Lo cierto es que, a tenor de lo que nos enseñan las superficies más antiguas de la Luna, hace más de 4000 millones de años la tasa de formación de cráteres centuplicaba la tasa de tiempos geológicos más recientes. Por este motivo, se ha avanzado la hipótesis según la cual la vida careció de condiciones favorables para su desarrollo hasta que el flujo de formación de cráteres descendió a un nivel próximo al de la actualidad.

La investigación reciente sobre cra-

terización de impacto ha iluminado los periodos más antiguos de la geología. Sabemos así que la velocidad de craterización de impacto se redujo en la época en que se formaron las rocas superficiales más antiguas conocidas, hace 4000 millones de años. Para algunos, bastó ese intenso bombardeo para impedir la conservación de rocas de la superficie cuya edad superara los 4000 millones de años.

Al estudio de la formación de cráteres la geología le debe la hipótesis sobre el origen de la Luna. Los modelos de ordenador han mostrado que nuestro satélite pudiera ser fruto de una colisión entre la prototierra y un cuerpo del tamaño de Marte. Esta hipótesis fue avanzada hace 20 años, al descubrirse que la química de las muestras lunares era similar a la característica de las rocas profundas del manto terrestre. Hubo una observación adicional: la Luna tenía un núcleo de hierro insólitamente pequeño. Por recientes modelos realizados con ordenador conocemos que el impacto de un objeto de la talla de Marte sobre nuestro planeta crearía una nube de vapor que permanecería en órbita de la Tierra. El vapor se compondría de una mezcla de elementos procedentes del proyectil y del manto terrestre y contendría escasa proporción de material del núcleo. El vapor tardaría escasos centenares de años en condensarse y compactarse hasta formar un satélite en órbita de la Tierra, como la Luna. El hecho de que podamos modelar el origen de la Luna con éxito y atribuirle un gigantesco impacto no significa que la Luna se haya formado así. Pero los modelos satisfacen muchas de las propiedades físicas y químicas del sistema Tierra-Luna, y los astrofísicos se han aprestado a examinarlos; en cualquier caso, los modelos sugieren el papel fundamental desempeñado por ese impacto en la evolución de la Tierra y el Sistema Solar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMPACT AND EXPLOSION CRATERING: PLANETARY AND TERRESTRIAL IMPLICATIONS. Dirigido por D. J. Roddy, R. O. Pepin y R. B. Merrill, Pergamon Press, 1978.

METEORITE CRATERS. Kathleen Mark. University of Arizona Press, 1987.

TERRESTRIAL IMPACT STRUCTURES. Richard A. F. Grieve en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 15, págs. 245-270; 1987.

IMPACT CRATERING: A GEOLOGIC PROCESS. H. J. Melosh. Oxford University Press, 1988.

La información del cerebro al ojo

Un reloj circadiano ajusta la sensibilidad de los ojos de las cacerolas. El estudio del mecanismo implicado nos introduce en el conocimiento del control del cerebro sobre los órganos sensoriales de otros animales

Robert B. Barlow, Jr.

Durante algún tiempo se pensó que las cacerolas (*Limulus*) tenían un ojo primitivo, simple, que había sido poco menos que "olvidado" por la evolución. En realidad, la evolución ha tratado bien a esos xifosuros. Los estudios anatómicos y fisiológicos están demostrando que este animal de 350 millones de años ha desarrollado un sistema visual complejo y refinado que incorpora mecanismos elegantes para adaptar su sensibilidad a los ciclos diarios de luz y oscuridad.

El hombre apenas ve de noche. El mundo de las cacerolas puede ser tan luminoso de noche como durante el día. La búsqueda de los mecanismos por los que *Limulus* logra semejante proeza ha contribuido al conocimiento de un fenómeno fascinante. El cerebro y sus órganos sensoriales no se limitan a ser receptores pasivos de información del mundo exterior; antes bien, el cerebro controla activamente esos órganos para optimizar la información que recibe.

Durante los últimos diez años mis colegas y yo hemos venido explorando la forma en que las cacerolas adaptan sus sistemas visuales. Nuestro resultado principal fue el descubrimiento de un reloj biológico de 24 horas en el cerebro de la cacerola que transmite señales nerviosas a sus ojos durante la noche. Estas señales sirven para aumentar, en un factor de hasta un millón, la sensibilidad de los ojos a la luz. Por curioso que parezca, este aumento extraordinario de sensibilidad durante la noche pasó inadvertido hasta las postrimerías de la década de los setenta, no obstante tratarse de uno de los sistemas visuales más estudiados del reino animal.

Limulus ha sido tema predilecto de estudio de los neurofisiólogos durante más de 50 años. H. Keffer Hartline inauguró la investigación del ojo de *Limulus* en 1926, cuando acudió al Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole en busca de un ojo "simple" que se prestara al estudio de los mecanismos celulares de la función retiniana. El ojo consta de alrededor de 1000 agrupaciones de fotorreceptores, llamados omatidios; el tamaño de cada uno centuplica el de los conos y bastones del ojo humano. Estos receptores son los mayores que se conocen en zoología.

Hartline y sus colaboradores no descubrieron la influencia que el cerebro de *Limulus* ejercía en el ojo porque extirparon el órgano del animal antes de registrar las respuestas de sus fibras sensoriales. Dos alumnos de doctorado de la Universidad de Syracuse, Stanley J. Bolanowski y Michael L. Brachman, hallaron los cambios circadianos en el ojo cuando les sugerí, como parte de su trabajo de curso, que registraran las respuestas del ojo sin extirparlo. Mis colegas y yo sospechábamos que las propiedades del ojo podrían variar del día a la noche, pero los estudiantes se quedaron asombrados al encontrar que la sensibilidad del ojo cambiaba según un ciclo diario, aun cuando mantuvieran el animal en la oscuridad más cerrada.

Ese ciclo circadiano no debiera haber sorprendido, ni siquiera en un organismo de la antigüedad de *Limulus*. En el hombre y en otros animales encontramos los relojes internos que controlan funciones corporales que van desde la vigilia y el sueño hasta la temperatura y los niveles de azúcar en sangre. En los mamíferos el reloj está situado en el núcleo supraquiasmático, un pequeño conglomerado de células nerviosas alojado encima del punto de cruce de los nervios ópticos. En las aves se halla en la glándula pineal, en la babosa de mar está en el ojo y en la cacerola el reloj se encuentra en la parte anterior del cerebro. El reloj de la cacerola establece conexiones neurales directas con todos los ojos principales del animal: lateral, medial y ventral.

La mayor parte de la investigación de los ritmos circadianos en las cacerolas se ha centrado en la salida del cerebro al ojo lateral, cuya función diurna se conoce bien. W. Henner Fahrenbach, del Centro Regional de Investigación en Primates de Oregón, encontró la docena de fibras eferentes en el tronco del nervio óptico que llevan señales del cerebro al ojo lateral. Las fibras entran en la retina y se ramifican profusamente, formando hasta cien conexiones sinápticas con las células de cada omatidio, alrededor de 100.000 conexiones en total.

La sección del nervio óptico impide que las señales del cerebro lleguen al ojo y bloquea los cambios rítmicos de sensibilidad. Pero, si esas señales se reproducen artificialmente, el ojo responde del mismo modo que si se tratase de una orden del cerebro. Por la noche, Bolanowski, Brachman y yo registramos la actividad neural del reloj en el extremo proximal seccionado

ROBERT B. BARLOW, Jr., ha estudiado el sistema visual de la cacerola de las Molucas durante más de 25 años. Se licenció en física en el Bowdoin College y se doctoró en biofísica por la Universidad Rockefeller. Enseña neurología en el instituto de investigación sensorial de la Universidad de Syracuse, tarea que comparte con la de investigador de oftalmología en la Universidad estatal de Nueva York. Dedica los meses de verano al Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole.

del nervio óptico conectado al cerebro; al día siguiente, conectamos un electrodo en el extremo del nervio que penetra en el ojo y reprodujimos la actividad neural. La sensibilidad del ojo aumenta inmediatamente; las señales registradas en el cerebro por la noche pueden conducir al ojo a su estado de alta sensibilidad nocturna en cualquier momento.

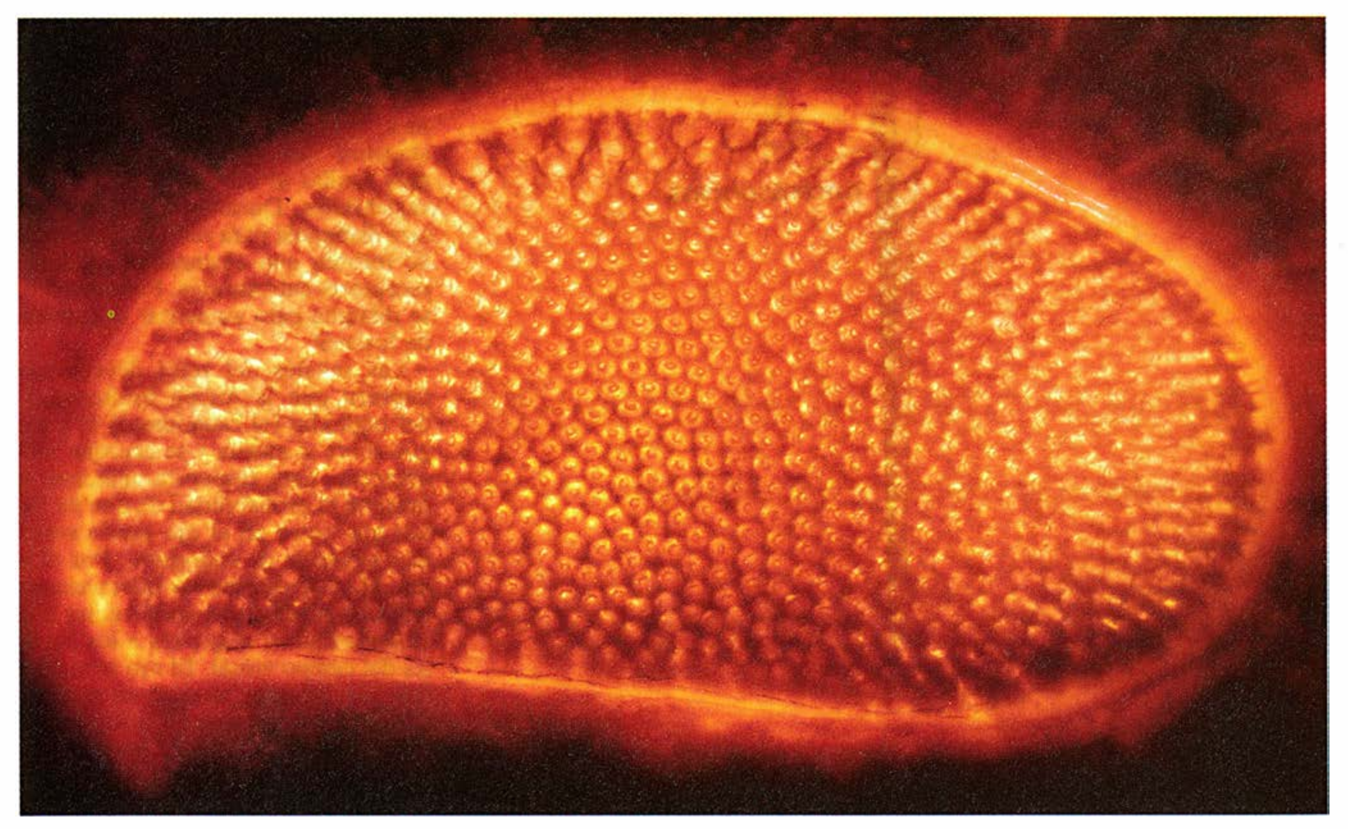
Una medida cómoda de estos cambios diarios en la sensibilidad de los ojos es el electrorretinograma, o ERG. Para registrar un ERG se coloca un electrodo conductor en la superficie corneal; un destello excita todos los fotorreceptores del ojo y genera un potencial eléctrico total que queda entonces registrado. El ERG, fácil de medir, no lesiona a *Limulus*, pudiéndose obtener datos del mismo animal durante largos períodos.

Hemos encontrado que las respuestas retinianas (medidas por la amplitud del ERG) son mayores de noche que de día, lo mismo en individuos expuestos a la luz natural que en los que se mantienen en constante oscuridad. La amplitud empieza a aumentar hacia la hora del crepúsculo, alcanza un máximo durante las primeras horas del atardecer, comienza a disminuir después de media noche y recupera su nivel diurno al alba. Este ciclo de cambios en la sensibilidad retiniana puede continuar ininterrumpidamente durante al menos un año; tal es el período más largo durante el cual hemos registrado potenciales en un mismo animal mantenido en la oscuridad.

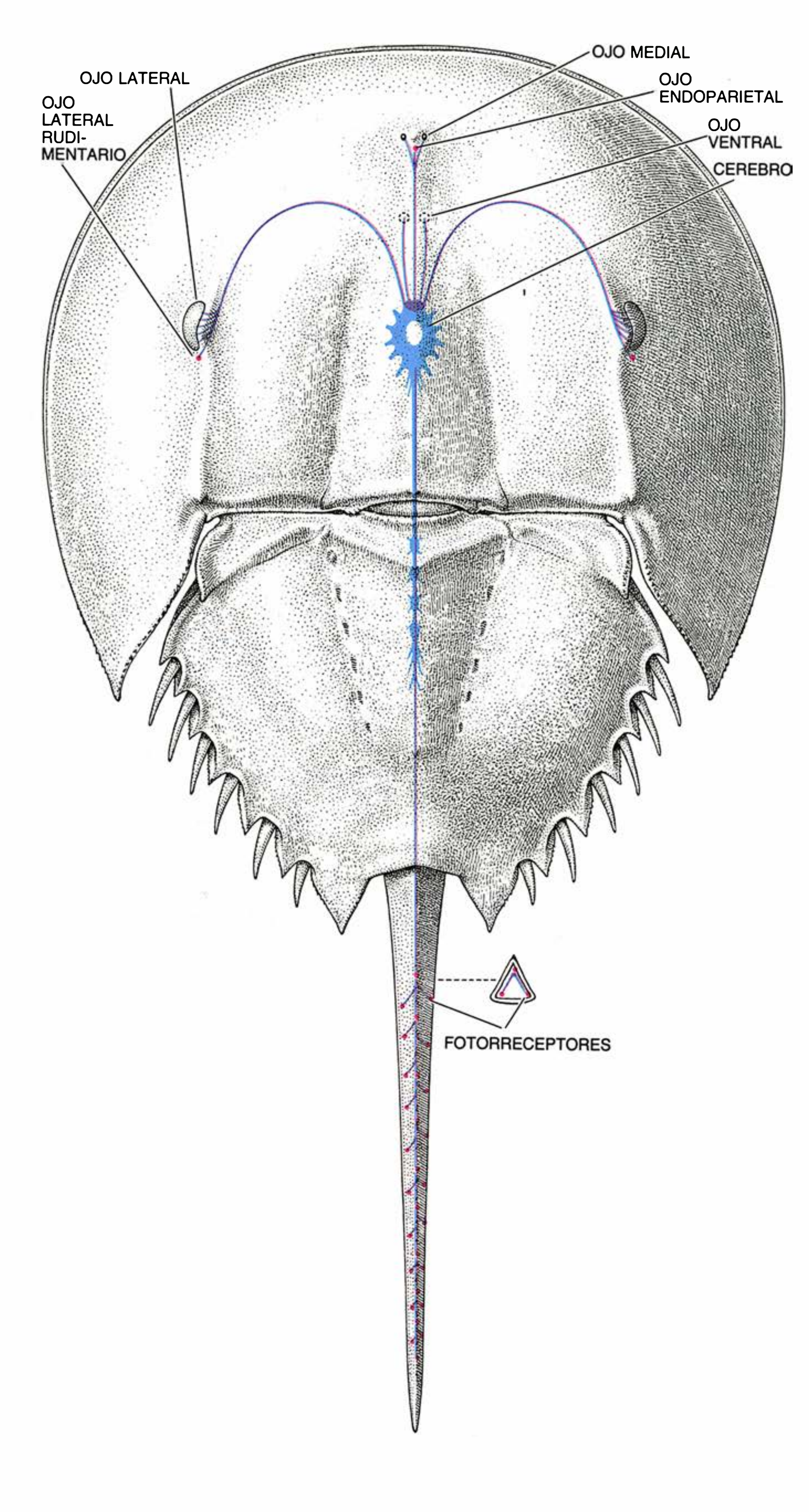
El ritmo interno tiene un período de unas 24 horas; cuando exponemos las cacerolas a la luz natural, unas señales provenientes de células fotorreceptoras situadas en su telson ("cola") ayudan a mantener el reloj circadiano sincronizado con el ciclo real de luz y oscuridad. (Dos pequeños ojos que el animal posee en la parte dorsal de su cuerpo, los ocelos mediales, envían al cerebro señales suplementarias que aumentan la intensidad de la respuesta circadiana a tenor de la cantidad de luz ultravioleta existente en el cielo por la noche.)

Una vez confirmado que un reloj interno controla la sensibilidad del ojo de *Limulus*, se comenzó a trabajar para dilucidar los mecanismos subyacentes bajo ese control. En Woods Hole, y en colaboración con Ehud Kaplan, de la Universidad Rockefeller, George H. Renninger, de la Universidad de Guelph, y Takehito Saito, de la Universidad de Tsukuba, introdujimos pequeños electrodos de vidrio en las células fotorreceptoras subyacentes a través de un orificio abierto en la córnea. El patrón de ruido intrínseco de las células (señales eléctricas generadas al azar) y su respuesta a la luz mostraron un claro ritmo circadiano. Lo más notable de estos cambios fue que contravinieron las reglas habituales que gobiernan el comportamiento, tanto de los fotodetectores biológicos como de los artificiales. El aumento de sensibilidad suele ir acompañado por un aumento de ruido, pero la señal generada por el ojo de la cacerola aumenta cuando su nivel de ruido disminuye.

Lo mismo en vertebrados que en invertebrados, la primera señal que puede registrarse después de un estímulo visual es un cambio en el potencial a través de la membrana que rodea a una célula fotorreceptora. Un destello intenso conlleva una disminución del potencial transmembrana de hasta 50 milivolt, que luego retorna a su nivel previo. Ese cambio de potencial es la suma de muchos saltos cuánticos ("quantum bumps"), cada uno de los cuales puede originarse por un solo fotón que incide en una molécula de rodopsina sensible a la luz. Los saltos también pueden ocu-



1. OJO COMPUESTO de la cacerola (*Limulus*). Se trata, quizá, del mejor estudiado de todos los sistemas neurales. Comprende alrededor de 1000 omatidios; consta, cada uno, de un cristalino (lente) y de células fotorreceptoras. El autor y sus colaboradores han encontrado que los omatidios experimentan importantes cambios estructurales y funcionales al atardecer, y de nuevo al amanecer, para adaptarse a los niveles cambiantes de luz.



2. OJOS DE *LIMULUS*, representados en este esquema del sistema visual del animal. Un reloj instalado en la parte anterior del cerebro envía señales que controlan la sensibilidad de los ojos laterales y mediales. Los fotorreceptores situados a lo largo del telson ("cola") del xifosuro sincronizan el reloj a los ciclos diarios de luz y oscuridad. Otras señales que llegan al cerebro provenientes de los pequeños ojos mediales aumentan el grado de adaptación a la oscuridad, de acuerdo con la cantidad de luz ultravioleta que esos ojos reciben del cielo por la noche. (Dibujo de Tom Prentiss.)

rrir espontáneamente. Cuando se deja un *Limulus* en plena oscuridad, sus células generan, a menudo y de manera espontánea, saltos cuánticos durante las horas del día: el ojo en su estado diurno es ruidoso. Durante la noche, las señales enviadas por el reloj circadiano del cerebro reducen drásticamente la frecuencia de saltos cuánticos espontáneos y, con ello, el ruido de fondo del ojo.

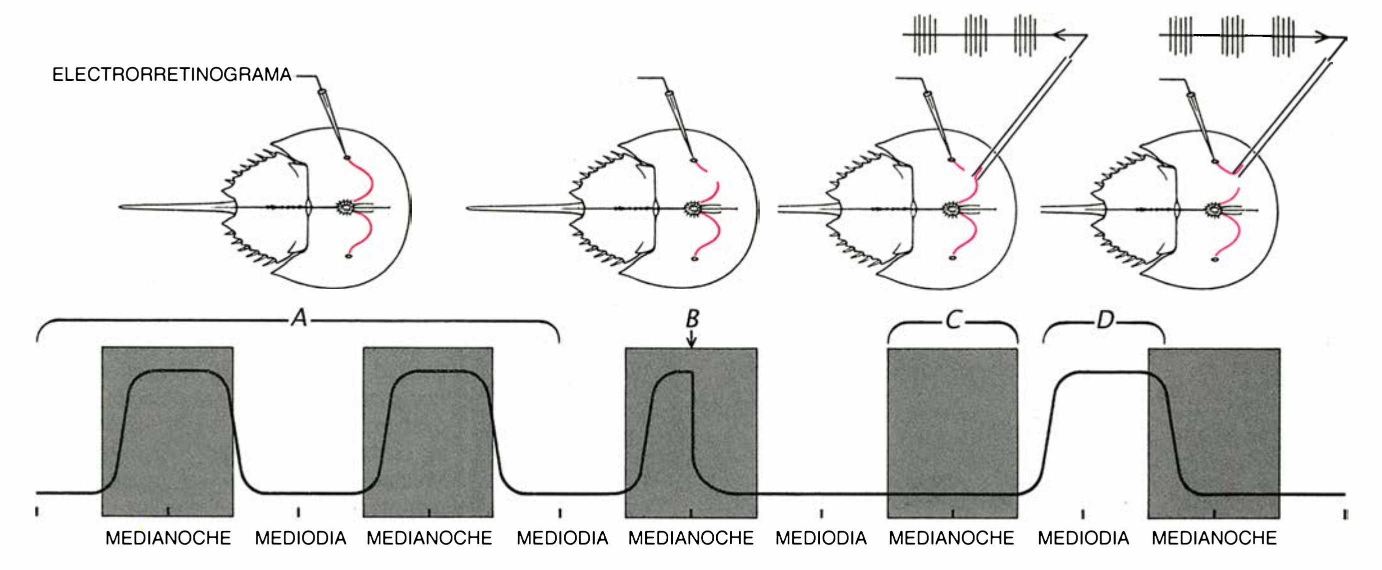
Cuando el ruido interno del ojo disminuye, la respuesta de cada fotorreceptor aumenta: hay estructuras intracelulares que se modifican para aumentar la probabilidad de que un fotón que entre en el ojo desencadene un salto cuántico; los saltos generados de noche duran más que los del día. Las señales que emite el reloj hacia la retina por la noche prolongan el salto cuántico originado por un fotón; cabe pensar, pues, que el salto probablemente se solapa con otro salto y produce un cambio del potencial de membrana que genera un impulso nervioso.

Sin embargo, esta mayor duración de los saltos cuánticos reduce la respuesta del ojo a cambios rápidos en iluminación. Como demostramos Ranjan Batra, de la Universidad de Connecticut, y yo, las cacerolas intercambian resolución temporal por aumento de sensibilidad.

Los otros cambios en el ojo de este animal potencian todavía más la sensibilidad, pero lo hacen a expensas de la resolución espacial. Con Steven C. Chamberlain, de Syracuse, observamos que cada omatidio poseía una abertura que funcionaba de forma muy similar al iris de los ojos de los vertebrados. Durante el día, la abertura disminuía para reducir el número de fotones que alcanzaban los fotorreceptores subyacentes. Por la noche, se dilataba para aumentar la entrada de fotones.

Las señales del reloj determinan también que la región fotosensitiva del omatidio (el rabdómero) se pliegue sobre sí misma y se acerque a la abertura. Esta respuesta aumenta al máximo la probabilidad de que un fotón que entre en el ojo incida sobre una molécula de rodopsina. Por último, el reloj debilita las interacciones laterales inhibidoras en la retina que incrementan su respuesta a los perfiles del campo visual. El ojo se vuelve más sensible a la luz pero pierde sensibilidad al contraste. Es más, durante la noche los campos visuales de omatidios contiguos se solapan parcialmente, de forma que la visión de la cacerola se torna ligeramente borrosa.

Este tipo de intercambios está muy extendido en el reino animal. El hom-



3. CORRESPONDE AL NERVIO OPTICO conducir señales desde el cerebro de la cacerola hacia su ojo; así lo demuestra este experimento realizado por el autor y sus colaboradores. El cerebro de un individuo sin manipular (*a*) envía señales al ojo por la noche que aumentan su sensibilidad a la luz. La sección del nervio (*b*) interrumpe la transmisión de señales; la respuesta del ojo se reduce a su bajo nivel diurno. Si se registran en el nervio óptico (*c*) las señales nocturnas provenientes del cerebro y a continuación se reproducen en el ojo (*d*), la sensibilidad ocular aumenta.

bre, por ejemplo, cambia de conos a bastones en respuesta a la luz débil. Los conos se agrupan densamente en la fóvea, en el centro de la retina; aunque proporcionan gran agudeza visual, requieren por lo menos niveles moderados de luz. Los conos también tienen gran resolución temporal, pero no pueden sumar las señales recibidas: cada uno tiene su propia conexión directa con el nervio óptico. Los bastones, por el contrario, abundan en la periferia de la retina. De pobre agudeza y resolución temporal, pueden, sin embargo, detectar fácilmente fotones aislados de luz; varios bastones pueden generar por adición una señal de salida que excitará a una sola neurona.

La mayoría de los animales con ojos dotados de bastones y conos dependen de los cambios de luz ambiental para controlar la sensibilidad. No así *Limulus*, cuya retina contiene exclusivamente una clase de fotorreceptores, se adapta al día y a la noche mediante un reloj interno. El reloj modifica las propiedades de los receptores con antelación a los cambios en intensidad luminosa.

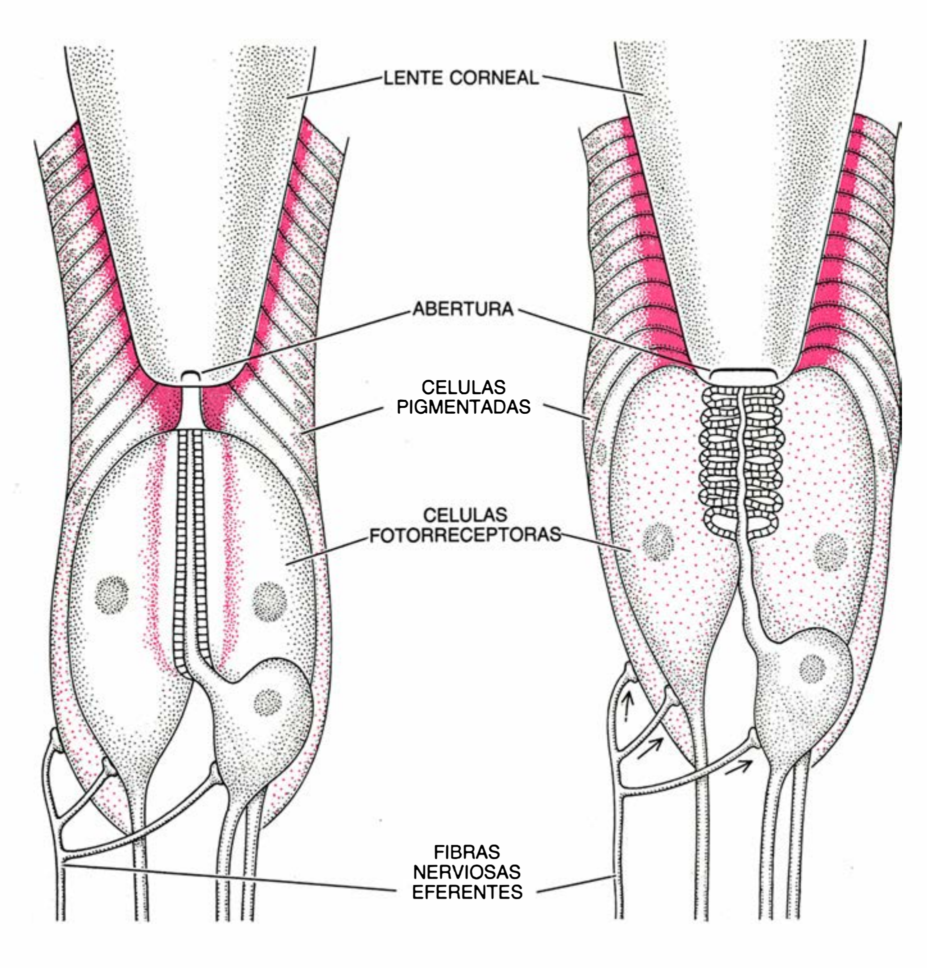
¿De qué forma las señales del reloj circadiano del cerebro, que se transmiten al ojo por fibras nerviosas eferentes, producen cambios celulares tan drásticos? Barbara-Ann Battelle y sus colegas, de la Universidad de Florida, han estudiado esta cuestión junto con Renninger, Leonard J. Kass, de la Universidad de Maine, y el autor. Hemos encontrado que el neurotransmisor octopamina es un compuesto químico clave. Se acopla a los receptores de membrana de la célula fotorreceptora. Estos receptores activan la enzima adenilato-ciclasa, que interviene a su vez en la producción de AMP-cíclico dentro del fotorreceptor. El AMP-cíclico desempeña su conocido papel como segundo mensajero; en este caso transmite el efecto de la octopamina provocando cambios en el citoesqueleto que modifican la forma de los fotorreceptores, amén de cambios en los canales iónicos que potencian la respuesta de la célula a los fotones. Es probable que otro neurotransmisor, todavía por identificar, actúe con la octopamina para producir los cambios nocturnos en el ojo de las cacerolas. La inyección de octopamina o análogos del AMP-cíclico en el ojo durante el día induce la fase nocturna de la retina, pero la transformación es incompleta.

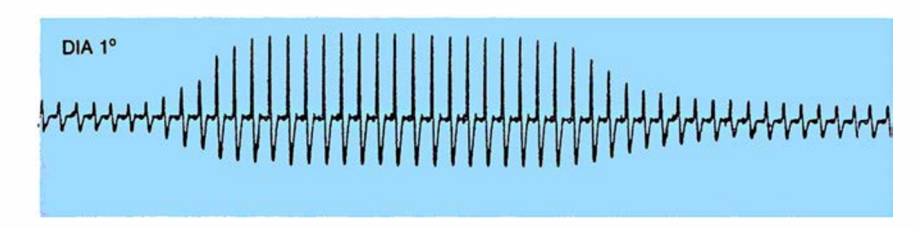
La octopamina y otros factores aumentan la sensibilidad del ojo. ¿Qué factores la debilitan? Herman K. Lehman, de la Universidad de Arizona, Chamberlain y yo hemos desarrollado un modelo basado en un mecanismo de presión-atracción ("push-pull"): señales del cerebro que se inician hacia el atardecer liberan neurotransmisores que colocan ("push") la retina en su fase nocturna. Estas señales se desvanecen hacia el amanecer, permitiendo que una hormona circulante, también por identificar, traiga ("pull") la retina de nuevo a la fase diurna antes del alba. (Bruce G. Calman, de la Universidad de Florida, Lehman y el autor descubrieron que los ojos mantenidos en un medio de cultivo y privados de señales circadianas no volvían a la fase diurna, salvo que se agregaran al medio ciertos extractos hemáticos.)

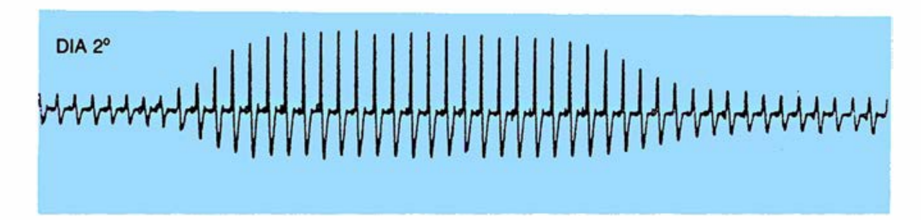
Importa sobremanera que el ojo torne a su fase diurna antes del amanecer, ya que su función podría quedar gravemente dañada aun cuando se le expusiera a niveles moderados de luz en la fase nocturna. Durante el día, parece ser, la hormona circulante reduce la sensibilidad del ojo y lo protege así de la luz.

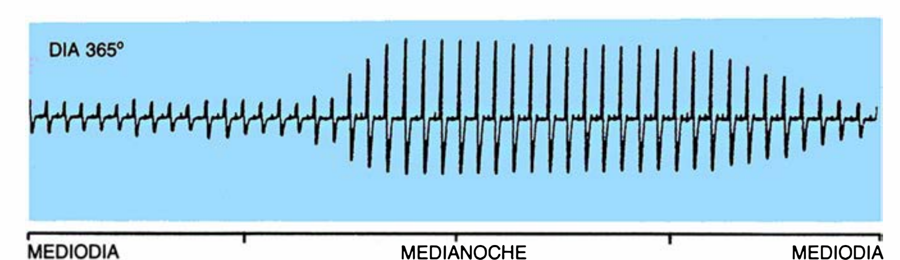
Aunque la hormona circulante es responsable directa de la transición al estado diurno, el reloj de la cacerola controla el proceso metabólico que restablece la estructura fotosensible del ojo. Chamberlain y yo encontramos que las señales nocturnas del reloj preparaban la retina para un desensamblamiento y reconstrucción masivos de las membranas que contenían rodopsina, procesos desencadenados por la luz del amanecer. Las señales del reloj constituyen también un precursor necesario de ulteriores adaptaciones estructurales protectoras que experimentan los omatidios durante el día en respuesta a una iluminación intensa.

El descubrimiento de un ciclo diario bien orquestado en el ojo de la cacerola replanteó una pregunta pendiente desde hacía tiempo: ¿para qué utiliza *Limulus* sus ojos? Hartline bromeaba y decía que estaba "estudiando la visión en un animal ciego". Aunque el sistema visual de las cacerolas ha sido motivo de intenso y dilatado estudio, a lo largo de más de 60 años, nadie había, hasta hace poco, encontrado un papel para la vi-









4. ESTRUCTURAS SENSIBLES A LA LUZ del ojo de las cacerolas. Nos muestran considerables cambios del día (*arriba, izquierda*) a la noche (*arriba, derecha*). La apertura que restringe la entrada de luz en los fotorreceptores se ensancha, los granos de pigmento que absorben la luz dispersa se separan y los rabdómeros (membranas sensibles a la luz) se pliegan para presentar una mayor superficie a iluminar. Además de estos cambios estructurales, el ojo de las cacerolas experimenta alteraciones fisiológicas que aumentan la respuesta neural a cada fotón de luz captado. Los registros del electrorretinograma (*diagramas inferiores*) ponen de manifiesto que el ciclo de aumento y disminución de sensibilidad persiste incluso cuando el animal se mantiene en total oscuridad.

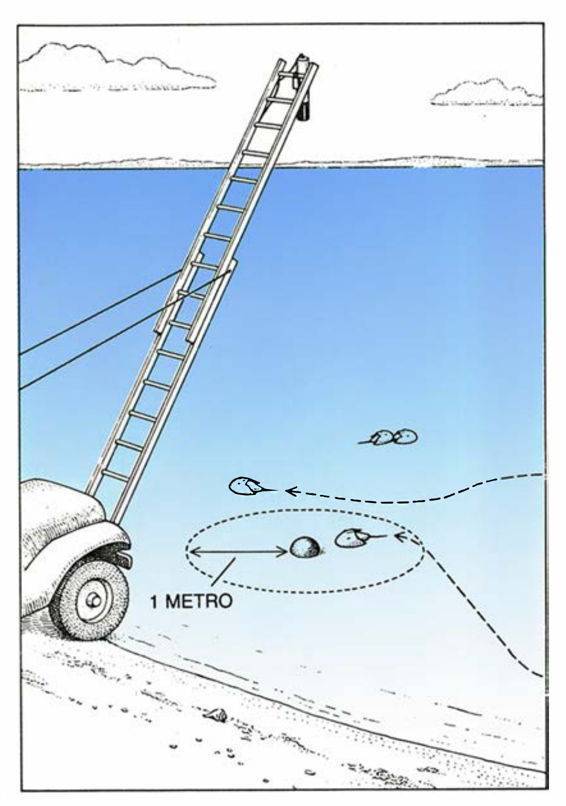
sión en el comportamiento del animal. Por lo que, al parecer, éste no utilizaba sus ojos para buscar alimento. Buceando en su compañía, descubrí que se apartan de las sombras que pasan por encima de uno de sus ojos, como las que se producen al mover un cuaderno de apuntes debajo del agua a la luz de la luna. Aunque la respuesta parece estar destinada a evitar predadores, no conozco ningún animal que lo sea de *Limulus*.

Estos xifosuros desarrollan una actividad compleja de apareamiento. Por primavera, emigran desde aguas profundas hacia playas protegidas de la costa oriental de Norteamérica. Machos y hembras se aparean en pleamar; las hembras, con los machos colgando de sus caparazones, construyen bajo el agua nidos poco profundos cerca de la orilla. Las migraciones hacia la orilla son máximas durante las pleamares nocturnas de las lunas llena y nueva.

Leonard C. Ireland (entonces en Woods Hole), Kass y yo diseñamos un experimento para someter a prueba la hipótesis de la intervención de la visión en el apareamiento de las cacerolas. Colocamos moldes de cemento de los caparazones de las hembras, amén de otras formas, en el fondo marino de la orilla de una playa cercana a Woods Hole. Nos dedicamos a observar el comportamiento de los machos que nadaban por allí. Los moldes negros de los caparazones de las hembras resultaron los más atractivos; provocaron la conducta de apareamiento de los machos: acercamiento, monta y liberación de esperma. Moldes de otras formas y distintas tonalidades de gris, aunque atrajeron a los machos, no provocaron la conducta de apareamiento.

Ni que decir tiene que no se guiaron por señales químicas: nuestros moldes de cemento no las liberaban. Es más, los machos que habían sido privados de la vista cubriendo sus ojos, no se acercaron a ninguno de los moldes ni intentaron aparearse con ellos. Se sirven, pues, de los ojos para buscar pareja.

Más aún. Los cacerolas parecen gozar de buena vista. Maureen K. Powers, de la Universidad Vanderbilt, Kass y yo filmamos el comportamiento de los machos alrededor de los moldes de hembras sumergidos noche y día. (De noche, adaptamos a la cámara un intensificador de imagen que amplificó la luz ambiental 20.000 veces.) La distancia máxima a la que veían los machos (la proximidad requerida para girarse hacia el molde y acercarse a él) vino a ser de un metro durante el día y 0,90 metros durante







5. LA CAMARA DE VIDEO y el intensificador de imagen registran la respuesta de los machos (*izquierda*) a moldes de cemento que pretenden parecerse a la hembra de *Limulus* en mayor o menor grado. Un molde de una hembra (*arriba, derecha*) provoca la respuesta completa de apareamiento (aproximación, monta y liberación de esperma) cuando un macho pasa a una distancia tal que puede ver dicha añagaza. Los machos se acercan a otros objetos (*abajo, derecha*) momentáneamente, pero no permanecen en su vecindad ni desarrollan el comportamiento de apareamiento.

la noche. El aumento de un millón de veces de la sensibilidad retiniana compensó, casi por completo, la disminución de intensidad luminosa después del crepúsculo.

A un metro de distancia, la imagen que un macho se hace de la hembra se construye a partir de las señales de respuesta de muy pocos omatidios, quizá de sólo 4. El macho podría trabajar cerca de los límites ópticos de su ojo compuesto cuando busca hembras; aún así, consigue su propósito. Y aunque las cacerolas sacrifican agudeza visual por la noche para captar cuantos fotones puedan, parece que todavía se pueden ver unos a otros.

El macho puede girar, pues, hacia un objeto cuya imagen está formada en el cerebro por señales provenientes de unos cuantos omatidios. Esto plantea la pregunta de qué información envía el ojo, modulada como está por señales circadianas, al cerebro. El ojo de *Limulus* es uno de los pocos circuitos de células neurales cuyas conexiones y comportamiento se han modelado con precisión. Las ecuaciones que describen su respuesta a imágenes estáticas se conocen desde hace unos 30 años, y las que describen la respuesta a imágenes móviles desde casi 20. No existe ningún modelo para circuitos neurales de semejante tamaño o complejidad.

En teoría, la comparación entre las respuestas a la misma imagen de células en el ojo de *Limulus* con el modelo podría aumentar significativamente el conocimiento sobre la información que debe transmitir el ojo al cerebro para ver. En la práctica, hasta hace poco, los cálculos a realizar a partir de las ecuaciones de los distintos omatidios desafiaban hasta los ordenadores más rápidos y potentes. Tan sólo la llegada de los grandes ordenadores con procesamiento en paralelo ha permitido abordar un circuito de mil elementos y decenas de millares de conexiones.

Con Ramkrishna V. Prakash y Eduardo C. Solessio, de la Universidad de Syracuse, hemos programado mil procesadores en una "Máquina de Conexiones" para modelar la retina de la cacerola; suministramos a la máquina imágenes simuladas de una cámara sumergida y calculamos la respuesta del ojo. Kaplan y yo también hemos implantado electrodos en *Limulus* para registrar la respuesta de fotorreceptores individuales, mientras el animal se arrastra por el fondo y ve la misma imagen que filma nuestra cámara de vídeo.

Hasta ahora los resultados son prometedores y atrayentes. Un resultado bastante sorprendente de las simulaciones es el relativo al conocimiento del papel primordial del movimiento en la visión. El ojo responde a la presencia de objetos que se mueven atravesando su campo visual con mucha mayor intensidad que a otros estacionarios. Por otra parte, la simulación indica que la combinación de las respuestas espacial y temporal del ojo podría optimizarse para detectar objetos del tamaño de otro *Limulus* moviéndose en el campo visual a velocidades a las que la cacerola caminaría. (Para el ojo de la cacerola en movimiento, los objetos estacionarios parecen hallarse en movimiento, y así el macho detecta los moldes de las hembras con la facilidad con que detectaría los objetos reales.)

La compleja integración entre el cerebro y el ojo de *Limulus* no es más que un ejemplo de las complicadas relaciones existentes entre el cerebro y los órganos sensoriales de casi todos los animales. A Santiago Ramón y Cajal, pionero en el campo de la neuroanatomía, le debemos el descubrimiento de la comunicación bidireccional entre el cerebro y el ojo de un ave en 1889: encontró conexiones entre neuronas de la parte alta del tronco encefálico y neuronas de la retina. En 1971, Frederick A. Miles, del Instituto Nacional de Salud de los EE.UU., demostró que esas conexio-

nes conducían señales que modificaban la forma en que la retina codificaba la información espacial, y deberían, por tanto, alterar el modo como un ave ve su mundo.

Se han encontrado conexiones eferentes similares en muchos animales más, desde los nervios que aumentan la respuesta sensorial global en algunos peces hasta los que transmiten señales del cerebro al oído en humanos y en otros primates. En el núcleo geniculado lateral del hombre, donde se realizan las primeras etapas del procesamiento de la información visual, las conexiones neurales eferentes que proceden de otras partes del cerebro superan las conexiones aferentes que llegan del nervio óptico. Parece ser que el cerebro, tanto como el ojo, determina cómo es nuestra visión.

Pero personas y aves encierran gran complejidad y nadie sabe exactamente cómo ven, ni mucho menos de qué manera sus cerebros modulan la visión. El trabajo realizado en sistemas neurales más simples como *Limulus* puede ayudar a aclarar esas cuestiones en especies complejas. Por último, las investigaciones cada vez más refinadas, basadas en los trabajos realizados en cacerolas, podrán explicar quizás cómo la imagen incompleta e inestable que proporcionan los órganos de los sentidos, modulada tanto por el cerebro como por el ambiente, provoca sensaciones directas e incontrovertibles: la imagen de una puesta de sol, el olor de una rosa o el sonido de una fuga de Bach.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CIRCADIAN RHYTHMS IN *LIMULUS* PHOTORECEPTORS: I. INTRACELLULAR STUDIES. Robert B. Barlow, Jr., Ehud Kaplan, George H. Renninger y Takehiko Saito en *Journal of General Physiology*, vol. 89, n.º 3, págs. 353-378; marzo de 1987.

VISION AND MATING BEHAVIOR IN *LIMULUS*. Robert B. Barlow, Jr., Maureen K. Powers y Leonard Kass en *Sensory Biology of Aquatic Animals*. Dirigido por Jelle Atema, Richard R. Fay, Arthur N. Popper y William N. Tavolga. Springer-Verlag, 1988.

CENTRIFUGAL PATHWAYS TO THE RETINA: INFLUENCE OF THE OPTIC TECTUM. Hiroyuki Uchiyama en *Visual Neuroscience*. vol. 3, págs. 183-206; 1989.

CIRCADIAN RHYTHMS IN INVERTEBRATE VISION. Robert B. Barlow, Jr., Steven C. Chamberlain y Herman K. Lehman en *Facets of Vision*. Dirigido por D. G. Stavenga y R. C. Hardie. Springer-Verlag, 1989.

WHAT THE BRAIN TELLS THE EYE (vídeo). Robert B. Barlow, Jr. Woods Hole, Mass., Technical Video Ltd, 1989.

Los mitos clásicos

Relatos tradicionales que perviven en la memoria colectiva, los mitos, protagonizados por dioses y héroes, explican el mundo. En Grecia, los poetas fueron los guardianes de la mitología, a la par religiosa y literaria

Carlos García Gual

Puesto que tanto la palabra "mito" como el adjetivo derivado "mítico" suelen usarse en ciertos medios de prensa y publicidad con un sentido muy vago y bastante equívoco —por ejemplo, cuando se habla del "mito de la Bolsa", o de que este producto es "más que un mito" o del "mítico fulano"— parece pertinente comenzar, a la manera de los escolásticos, con una definición del término.

La que da el *Diccionario de la Real Academia Española* (DRAE) —según la cual "mito" es: "Fábula, ficción alegórica, especialmente en materia religiosa"— resulta, por otra parte, algo dieciochesca y evidentemente inadecuada, tanto al uso y abuso vulgar, como a un empleo más ajustado y clásico del vocablo. Que, por otro lado, fue aceptado por el DRAE en una fecha tan tardía como 1884. ("Mitología", en cambio, se usaba y estaba recogido ya en el siglo XVIII.) Propongo, pues, definir "mito" como un "relato memorable y tradicional que cuenta la actuación de unos personajes extraordinarios (dioses y héroes en los mitos clásicos) en un tiempo prestigioso y lejano".

Subrayemos todas estas notas, comenzando por la de "relato". Un mito es una *narración* que puede luego descomponerse o analizarse en secuencias menores, temas o motivos ("mitologemas", "mitemas"). El mito de Edipo, por ejemplo, es la historia de éste y de su familia, que comprende varios episodios menores. Un relato mítico posee cierta estructura y, por ello, puede analizarse estructuralmente. Cabe pensar que esa estructura narrativa ofrezca un nivel profundo frente a lo que dice más superficialmente. Puede que haya elementos cargados de simbolismo en el mito. Pero, para nuestra definición, quedémonos sólo con el rasgo de "relato".

Es "memorable" en cuanto está confiado a, y pervive en, la memoria colectiva, de toda la comunidad, o bien de un grupo importante de la misma. Los mitos son "las historias de la tribu". (Claude Lévi-Strauss y otros antropólogos han insistido en este rasgo como una de las características de "lo mítico". Marcel Detienne ha escrito que los mitos "viven en el país de la memoria".) Esa pervivencia en el recuerdo de las gentes es lo que funda lo mítico, reconocido como algo de interés para la colectividad. Tal vez porque en esos relatos se cifra un saber del mundo, una sabiduría fabulosa, un repertorio de hazañas paradigmáticas, una historia religiosa. En cierto modo, muchos mitos se rememoran —en las fiestas y ceremonias públicas— como explicaciones fundamentales del orden social, como aquello que nadie debe desconocer ni olvidar. "Un pueblo sin mitos —dijo Georges Dumézil— se moriría de frío." A través de los mitos se suministra una versión del mundo y sus comienzos, del sentido de la vida, de los orígenes de la sociedad y su configuración básica, en fin, de lo más importante del cosmos.

Por eso los mitos son "tradicionales". No se inventan, sino que se heredan. Vienen de atrás. Son creencias que no se tienen, sino en las que se está, por recordar la distinción orteguiana. Cómo se transmiten y manejan los mitos es un tema cultural de la mayor importancia para una sociedad. Justo porque los mitos funcionan como esquemas de acción, explicativos y paradigmáticos, la evolución histórica de la sociedad puede afectar a su crédito. La tradición no sólo transmite los arcaicos relatos, sino que también puede corroerlos, a menos que el repertorio mítico se proteja dogmáticamente, por ejemplo presentándose como una revelación intocable en un libro básico o fundamental. (Frente a la libertad de los mitos griegos, las llamadas "religiones de libro" ofrecen ese aspecto, acorazadas en un rigor perenne.)

Los hechos y actuaciones que narran los mitos son extraordinarios y significativos, tanto por sus consecuencias como por sus actores (o sus "actantes"), que son dioses y héroes en la mitología que llamamos clásica. Hay temas míticos por excelencia, como son los de la creación y ordenación del mundo y los escatológicos, que tratan de lo que aguarda al hombre después de la muerte. La teogonía, la cosmogonía y la escatología son dominios de la mitología más extendida y tradicional. Cómo los dioses se repartieron el mundo, o cómo apareció la primera mujer, y quién inventó o robó el fuego, o si habrá una retribución justa después de la muerte, son temas esencialmente míticos. Pero también lo es la intervención de la divinidad en relación con ciertas figuras semidivinas o sobrehumanas, que son singularmente ejemplares para los demás, para los humanos que los veneran. Tal es el caso de los héroes, campeones de la cultura y pioneros de la civilización, luchadores contra los monstruos y exploradores de nuevos confines.

Dioses y héroes son los actores de las tramas míticas. Son las figuras del culto tradicional y, en ese respecto, la mitología va unida a la religión, de la que constituye el aspecto narrativo, o una cara de éste. Personajes divinos o semidivinos en su mayoría pueblan la floresta mitológica. Unos están más lejanos, otros más próximos a los hombres. Pero un rasgo general de los mitos es que nos presentan a esos

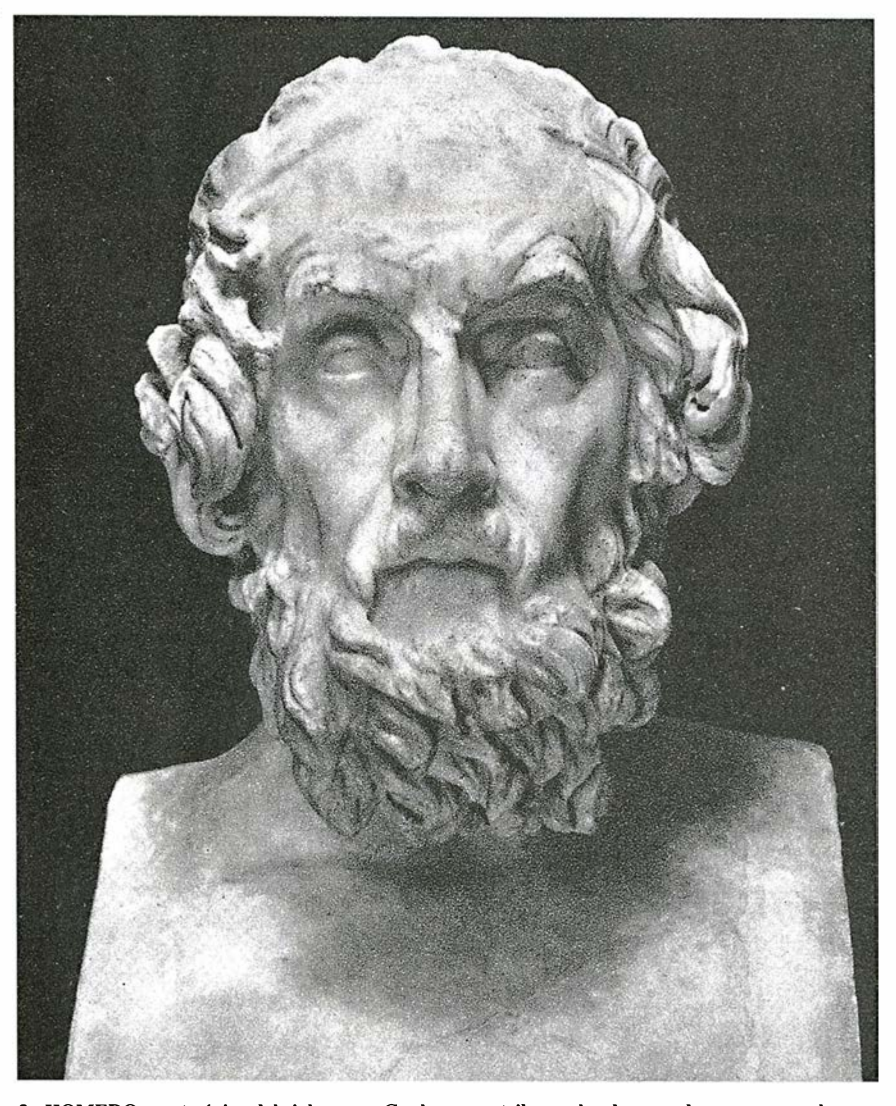
CARLOS GARCIA GUAL es catedrático de griego de la Universidad Complutense de Madrid, tras haber desempeñado el mismo cargo académico en la Universidad Nacional de Educación a Distancia y en la Universidad de Barcelona. Natural de Palma de Mallorca se formó en la Facultad de Filosofía y Letras de Madrid, donde se doctoró en el año 1968. Ha publicado varias obras sobre lingüística y filosofía griega y literatura antigua y medieval.

1. LAS PINTURAS en las ánforas representan escenas de mitos bien conocidos. En la superior se ofrece una ánfora ática pintada hacia el año 540 a. C.; observamos en ella una escena dionisíaca, con el dios Dioniso, señor del vino y del éxtasis. En la inferior, un ánfora del llamado "pintor de Andócides", se pinta una aventura de Heracles: su encuentro con el Cancerbero, el perro del Hades infernal, que el héroe mítico se llevó consigo.

grandes actores suprahumanos con una imagen humana —aunque tengan algunos rasgos bestiales o monstruosos a veces—. Los agentes del devenir cósmico tienen unos hábitos antropomorfos. Las narraciones míticas ofrecen una escenificación dramática peculiar: las dimensiones espaciales pueden ser extraordinarias, los gestos de los personajes sorprendentes, maravillosos, desaforados, pero siempre hay en su motivación y su desarrollo una representación antropomórfica. Los dioses y los héroes están hechos a semejanza del hombre.

Aunque sean más poderosos, más luminosos, más sabios, y, nota fundamental, los dioses escapen a la muerte, actúan y sienten de modo comparable a los hombres. Se relacionan unos con otros en una estructura familiar, se apasionan y se preocupan por sus honores, e incluso engendran hijos con gente mortal: muchos héroes son semidioses desde su mismo origen, como nacidos de un dios y una mortal o de una diosa y un mortal. Supremos, inmortales, felices, de vida fácil, los dioses están ligados al mundo de los humanos.

Pero estos sucesos míticos pertenecen a un tiempo ya pasado: el tiempo de los orígenes del mundo, un tiempo distinto del nuestro, un tiempo prestigioso en que los dioses mayores y menores frecuentaban el trato de los héroes y los humanos. Es ese tiempo maravilloso que las fiestas suelen evocar, que los ritos conmemoran y los mitos recantados en la ocasión ritual celebran. Mircea Eliade ha insistido mucho en ese aspecto, en sus estudios sobre lo sagrado y lo profano. La fiesta tradicional, con sus transgresiones y sus entusiasmos colectivos, trata de invocar ese espléndido tiempo sagrado, el de los hechos míticos, que de algún modo funda y fundamenta el orden social. Hubo una época en la que dioses y héroes crearon en sus magníficos actos lo que es nuestro mundo, fundaron instituciones (la religión, los sacrificios, la realeza, etcétera), abrieron caminos de aventura en el caso de los héroes civilizados, como Heracles y Teseo, y fijaron los hábitos y cultos. Los relatos míticos reconstruyen ese ámbito inmemorial. Los hombres caracterizados como de vida breve, esforzada y efímera, habitan en una sociedad en la que perduran las huellas de esos sucesos míticos.



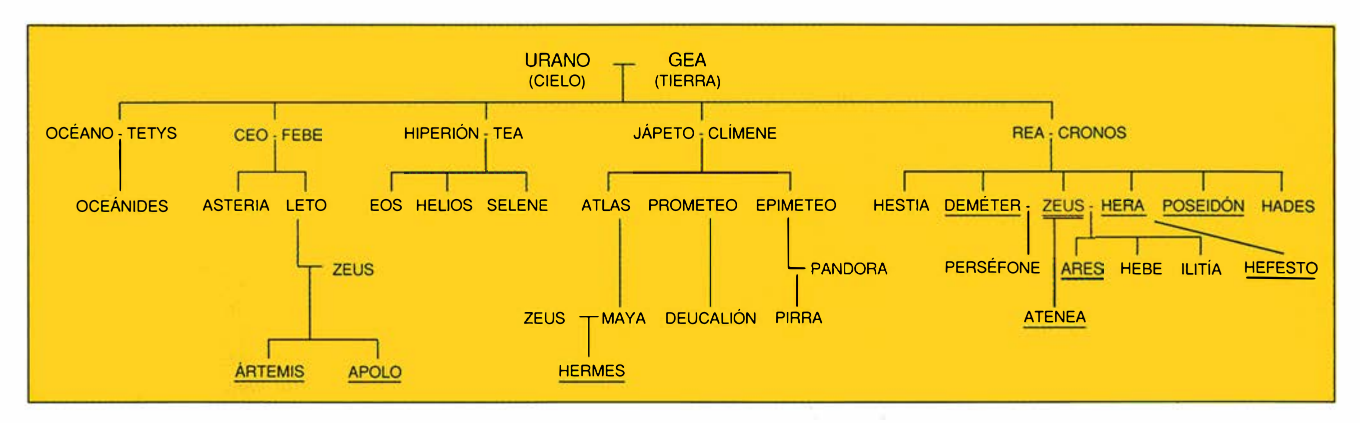
2. HOMERO, poeta épico del siglo VIII a. C. al que se atribuyen los dos grandes poemas con los que comienza la literatura griega. La *Ilíada* y la *Odisea* rememoran diversos episodios de la mítica guerra de Troya y del regreso de Ulises, rey de Itaca y protagonista de extraordinarias aventuras marinas. En sus poemas, junto a los héroes aparecen los dioses que intervienen en los sucesos humanos.

Lo que se ha llamado "pensamiento mítico" es aquel que, para explicar el mundo y las instituciones sociales, recurre fundamentalmente a los mitos, relatos arcaicos y etiológicos, o explicadores de las causas. (Cabe establecer una distinción entre grandes mitos sobre los dioses —como los narrados en la *Teogonía* de Hesíodo, poeta épico del siglo VIII a. C.— y las leyendas heroicas de la *Iliada* y la *Odisea*, gestas guerreras más cercanas a lo histórico.)

Aunque podríamos intentar alguna definición que distinguiera los grandes mitos de esas leyendas (por ejemplo, en el ámbito griego, el mito de Prometeo frente a la guerra de Troya), o que subrayara la cercanía de alguna leyenda heroica al *folktale* maravilloso con sus episodios arquetípicos (el mito de Perseo, luchador contra los monstruos y salvador de la princesa Andrómeda se aproxima en muchos aspectos al cuento de hadas), esa distinción, más fácil en la teoría que en la práctica, no nos resulta ahora de interés inmediato.

Importa destacar, además, que los mitos se presentan en un repertorio, en un *corpus narrativo* tradicional, que es una "mitología". (Además de ese sentido primero de "colección de mitos", la palabra "mitología" se usa a veces en el de explicación de los mitos o ciencia de los mitos. Aquí la utilizaremos sólo en la primera acepción.) La mitología nos ofrece un conjunto de relatos en los que opera cierta lógica y en los que actúan una serie definida de personajes. La gente conoce no mitos sueltos, sino esa red de relatos entrelazados con sus actores. Se sabe que cada uno de los dioses, por ejemplo, tiene unos determinados valores, que las relaciones entre unos y otros están definidas en el cuadro familiar, etcétera. Es decir, que, cuando en un mito griego se cuenta que aparece, digamos, el dios Hermes, ya presumimos qué papel se le puede haber asignado en la trama.

Hay dos autores griegos que intentan exponernos la mitología de una manera ordenada y sistemática: Hesíodo y Apolodoro; el segundo fue un



3. HIJOS DEL CIELO (*Urano*) y de la Tierra primordial (*Gea*) fueron los Titanes, de los que el más importante fue Cronos. De la unión de Cronos y Rea nacieron Hestia, Deméter, Hera, Poseidón, Hades y Zeus, el llamado "padre de los hombres y los dioses", el soberano del Olimpo. Zeus destronó a Cronos, como éste había destronado a Urano, y se repartió el dominio del mundo con sus hermanos Poseidón y Hades. Zeus obtuvo el cielo y la tierra, Poseidón el mar y Hades el mundo subterráneo de los muertos. Hijos de Zeus son los dioses más destacados del panteón helénico: Atenea, Ares y Hefesto —hijos de Hera, su legítima esposa—, Apolo y Artemis, Hermes y Dioniso. (En subrayado se distinguen los grandes dioses.)

erudito alejandrino del siglo II a. C. que redactó una *Biblioteca mitológica* con afán de recoger todos los mitos helénicos. Ese empeño sistemático, que de un modo literario y consciente aparece en estas obras, presupone una ordenación de los mitos que ya preexistía en su configuración original, aunque con una forma abierta y un buen número de variantes y de tonos diversos.

La mitología griega forma una especie de conglomerado en el que podemos destacar *grosso modo* tres contribuciones básicas: los mitos y dioses de origen indoeuropeo, que los invasores helénicos trajeron consigo desde el Norte; los de la cultura mediterránea anterior —el substrato pelágico o pregriego, que se mezcló con el aporte indoeuropeo en una intensa simbiosis—, y los influjos de la mitología oriental, de ese adstrato poderoso y antiguo de otras civilizaciones, como la sumeria, la egipcia, la babilónica y la asiria.

Es muy difícil, sin embargo, deslindar los elementos que provienen de uno u otro origen. Podemos decir que una figura divina como la de Zeus, el "padre de los dioses y los hombres", "el amontonador de nubes", "el que se goza en el rayo", revela una procedencia indoeuropea, y que tanto su nombre (semejante al latino Júpiter, o al védico Dyáus) como sus atributos de dios celeste y tormentoso, señor patriarcal del Olimpo, tienen paralelos en otros dioses europeos. Podemos advertir en Deméter ciertos componentes de una antigua diosa mediterránea, señora de los trigales y de los frutos, con resonancias ctónicas, ligadas al destino de su hija Core-Perséfone, esposa del dios Hades. Percibimos en Artemis, señora de las fieras, la gran diosa de Efeso, rasgos de una divinidad asiática.

Pero lo que encontramos es ya una combinación de influencias. Los mitos sobre la conquista de la soberanía por Zeus —en la sucesión de tres generaciones: Urano-Crono-Zeus, y en la lucha contra los monstruos primigenios— hallan claros precedentes en relatos orientales. Y el Zeus cretense del monte Ida —que allí nace y muere— recoge seguramente los trazos de un dios local pregriego.

Un conglomerado mítico no es una mera suma o amasijo de mitos (figuras divinas, imágenes, sistemas, episodios y símbolos), sino un entramado donde, como en un *bricolage* secular, se han ido engarzando y combinando todos esos componentes del repertorio heredado, con una sutil habilidad. Con variaciones locales, desde luego, ya que no podía ser de otro modo; con tonos y acentos diversos según lugares y épocas. El panteón de los dioses griegos se ha constituido en esa amalgama y la mitología que lo refleja ofrece, a pesar de su riqueza variopinta, una estructura bastante definida.

Del mismo modo, las leyendas heroicas (la de la guerra de Troya, o la de los Argonautas), que forman un segmento tan considerable de la mitología helénica, están en consonancia con ese mismo proceso. Aunque en muchos mitos heroicos (como el de Teseo y el Minotauro) podemos advertir, sin embargo, una referencia a la época minoica-micénica (siglos XX-XII a. C.), y a esa Edad Oscura en la que se elaboraron las sagas referentes a la guerra de Tebas o la de Troya (siglos XII-VIII), una etapa posterior en relación a la de la formación de los mitos teogónicos, de orígenes más lejanos y oscuros. En el caso de los mitos sobre una figura heroica como la de Heracles se pueden rastrear los diversos influjos que antes dijimos.

Una religión politeísta goza de una notable flexibilidad para acoger a dioses de variada procedencia, o para sincretizar imágenes o figuras de dioses que fueron independientes en su origen. Los griegos fueron muy hábiles en esas adaptaciones, y siempre supieron incorporar lo importado a su propio esquema de creencias o ideas, dándole un barniz o un acento propio. Más que abundar en ese tema de los orígenes diversos de la mitología griega, quisiera subrayar algunos rasgos peculiares de esa mitología: la distinción entre dioses y héroes, su afán de sistema y su riqueza simbólica, abierta a sucesivas interpretaciones.

Entre los dioses y los humanos están los héroes, que protagonizan numerosas gestas míticas. El lindero que los separa de los primeros es la mortalidad. Sólo los dioses son inmortales, *athánatoi* por excelencia; los semidioses heroicos son tan mortales como los hombres. Tras una vida gloriosa les aguarda, a veces pronta y violenta, la muerte. Sólo algunos, por especial y raro privilegio, logran traspasar la barrera fatal: Dioniso (más dios que héroe desde su nacimiento), Heracles y Asclepio.

La categoría de héroe es difícil de definir, como mostró Angelo Brelich en un excelente estudio. Hay héroes famosos, ensalzados por la épica, y otros menores y locales, con un culto limitado a la cercanía de su túmulo. Descienden de los dioses, pero de una unión con lo mortal; de la unión furtiva de un dios y una mujer o de un hombre y una diosa —como Heracles, en el primer caso, y Eneas o Aquiles, en el segundo—. Sirven de ejemplo a los posteriores por su audacia y su coraje en la acción, por su esforzado arrojo vital, por sus hazañas, pero están sujetos al dolor y la muerte. Algunos tienen una ascendencia divina algo más remota, como Odiseo o como Edipo, lo que no menoscaba su



4. ZEUS era el dios del cielo y las tormentas, el que amontona las nubes y maneja como arma suprema el rayo. Un dios de claro origen indoeuropeo. Su poder es muy superior al de las otras divinidades. Casado con Hera tiene otros muchos amoríos con diosas y mujeres, de los que nacen grandes dioses y héroes. Velaba por el orden cósmico y era el protector de la justicia (*Dike*).

grandeza. Intermediarios entre lo divino y lo humano, pertenecen al tiempo prestigioso que rememora la épica y que evoca, en contraste con el presente, la tragedia.

La abundancia de figuras heroicas y la riqueza de los episodios y aventuras que esos héroes protagonizan constituye un trazo peculiar de la mitología griega. A diferencia de los protagonistas de los cuentos maravillosos, los héroes tienen un nombre propio, una familia regia y una patria. Hay dinastías heroicas, como los Atridas de Micenas o los Labdácidas de Tebas. Otros héroes tienen tan gran personalidad que eclipsan su linaje: Aquiles, Odiseo, Teseo, Perseo, Orfeo y Jasón.

La idea de que la mitología forma un *corpus* imaginario cuyos elementos se definen por sus relaciones y oposiciones mutuas, y que funciona significativamente gracias a su organización sistemática, ha sido expuesta por algunos estudiosos de la religión griega, como Jean-Pierre Vernant y Walter Burkert. Es un enfoque que podemos considerar estructuralista, aunque con una perspectiva más amplia. (El enfoque estructural destaca en su análisis los elementos constitutivos del relato en su secuencia narrativa, advirtiendo que el sentido profundo de un mito está en esa configuración del conjunto, no en una mera suma o agregado, ni en las referencias simbólicas de sus componentes o elementos por separado.)

Cada figura mítica tiene, dentro del panteón clásico, un campo de actuación y unas prerrogativas definidas por la competencia de las otras. Dioses y diosas poseen sus ámbitos de protección y patrocinio bien delimitados. Consideremos, en breve ejemplo, las divinidades femeninas de primer rango: Hera, Deméter, Atenea, Afrodita, Artemis, Hestia y Hécate. Cada una posee su dominio específico y su ámbito de intervención. El matrimonio, la agricultura, la inteligencia, el amor, la virginidad selvática, el hogar y las misteriosas encrucijadas son los respectivos espacios reservados a esas diosas. La mutua armonía se funda en esa complementariedad y especialización de lo divino. Hay cierta oposición dialéctica entre Afrodita y Artemis (aquélla es la diosa del amor y del goce sexual; ésta, de la pureza virginal y la alegría agreste), como, en una oposición más amplia, la hay entre Apolo (dios del orden claro y el saber sereno, de la luz y la certeza) y Dioniso (divinidad del entusiasmo, la transgresión, el teatro y el vino); y puede resultar peligroso no advertir que se debe rendir culto a ambos dioses, según muestra el mito de Hipólito y Fedra, y el de Adonis.

A veces, dos divinidades parecen compartir un dominio, pero lo hacen bajo ángulos diversos. Así, tanto Ares como Atenea son dioses de la batalla, pero con distinto aspecto; Ares es el furor guerrero; Atenea, la astucia estratégica. Atenea y Hefesto son dioses de la habilidad artesana, aunque cada uno tiene su especialidad; la sagaz Atenea patrocina todos los productos manuales en los que brilla la inteligencia; Hefesto es el dios herrero, maestro del fuego y de la fragua, mágico, metalúrgico. Si Atenea es invocada junto a Poseidón por los navegantes, el dios lo es como señor del mar tremendo, y la diosa como inventora del navío y de la habilidad marinera. Hay, pues, un equilibrio de funciones y atributos. Lo que no excluye que algunos mitos nos cuenten cómo los dioses compiten por alguna ciudad o territorio: Poseidón y Atenea por el Atica, o Poseidón y Hera por Argos, saliendo en ambos casos derrotado el dios marino, señor del caballo y los terremotos, sacudidor de la tierra, frente a las diosas.

Zeus está por encima de los demás dioses. Es el soberano del Olimpo y todopoderoso *Pater familias*, en una

sociedad patriarcal y aristocrática. Desde la *Ilíada*, y aun más la *Odisea*, se percibe esa tendencia a destacar el poderío de Zeus sobre los otros dioses. Aunque son numerosos sus amoríos y se deja engatusar alguna vez por Hera, está por encima de las parcialidades que mueven a actuar a otros en beneficio de sus favoritos. Es el "señor de la justicia", el garantizador del orden, una vez que tras las luchas de soberanía se ha establecido en el Olimpo.

Según una hipótesis más difundida que fundamentada, Zeus sería el representante máximo de los dioses del cielo que depusieron a las antiguas divinidades femeninas, a la gran diosa de la tierra, al imponerse el patriarcado ario sobre el matriarcado anterior. No hay, sin embargo, en los mitos ninguna huella de ese combate de Zeus sobre divinidades femeninas anteriores. Ni rastros de una diosa blanca, como la que imaginó Robert Graves, con volantes cretenses.

La estructura familiar y el esquema genealógico permiten cohesionar a los dioses. Doce son las figuras mayores: Zeus, Poseidón, Hera, Atenea, Afrodita, Artemis, Apolo, Hefesto, Hermes (dios de las comunicaciones, el comercio, los ladrones y el guía de las almas en el Hades), Ares, Deméter y Dioniso. Pero hay también un dios infernal, Hades o Plutón, y otros de alcance limitado, como el rústico y caprípode Pan, o la recatada y hogareña Hestia.

Y, en un rango inferior o marginal, grupos de diosas como las Musas, las Horas y las Parcas (divinidades encargadas, respectivamente, de la poesía, las estaciones del año y sus frutos, y del destino de los humanos), y criaturas divinas de escasa personalidad mítica, como las nereidas, las ninfas, las sirenas o los faunos. Aquéllas y éstas forman alegres coros y decoran algunos parajes con su fantasmal presencia. La mitología puebla la naturaleza, animándola con un tropel de insinuaciones divinas, infiltrando *daímones* en los escenarios más diversos, postulando aventuras en las que se desliza la sombra de un dios, un gran dios como Apolo o Hermes, o una divinidad menor, como Pan o una ninfa, esquiva y presurosa o seductora en el fondo de las aguas.

Como decíamos, los mitos vienen de muy atrás, configurando una imagen del mundo heredada. Son relatos que se cuentan una y otra vez, de generación en generación, que se transmiten de viejos a niños, que hablan de unos orígenes fabulosos. Pero esa tradición mítica se desarrolla hasta una época histórica y, como ya apuntamos, la manera como la sociedad transmite los mitos afecta a su propia configuración.

Conviene subrayar que la transmisión de la mitología en Grecia tiene unas características propias. En primer lugar, el hecho de que fueran los poetas, y no los sacerdotes, los encargados de esa tradición —que fue a la par religiosa y poética— infundió al legado mitológico una brillante y sorprendente flexibilidad. En segundo lugar, la aparición de la escritura con un sistema alfabético —con lo que esto comporta de libertad y democratización de la cultura— en el siglo VIII a. C. modificó el marco y las formas de esa tradición de modo singular. Y, en tercer lugar, el desarrollo temprano de la "ilustración" griega, con el racionalismo y el escepticismo, con el nacimiento de la filosofía, la historia y el desarrollo de los primeros enfoques científicos en Grecia, a partir del siglo V a. C., significó una crítica radical a la aceptación de las explicaciones míticas, y, en conjunto, a esa forma de pensar que recurre a los mitos para explicar ingenua y fabulosamente la realidad y sus causas.

En Grecia fueron, desde un comienzo, los poetas los guardianes de los mitos. Ellos se encargaban de su transmisión y difusión a través de sus palabras inspiradas por las Musas, hijas de Zeus y de Mnemosyne, la Me-



5. ATENEA, diosa virgen y guerrera, de ojos glaucos, es la diosa de la inteligencia. Su símbolo era la lechuza y su árbol el olivo. Era la patrona de Atenas, por la que disputó con su tío Poseidón, el dios del mar. Protectora de los héroes y de los artesanos, tuvo su templo más famoso en el Partenón.

moria. Curiosas divinidades, en efecto, las Musas memoriosas y cantarinas que los aedos y los rapsodos invocaban al comienzo de sus cantos para que les apuntaran los temas y detalles que ellos, de nuevo, celebraban en sus versos. Las Musas garantizaban la veracidad de lo narrado. Mediante su inspiración, el poeta entraba en comunicación con el saber profundo sobre el pasado. Ellas eran el archivo divino, y la fuente en que los cantores y recitadores –*aoidoí*, *rapsodoí*– llenaban sus cántaros. Gracias a esa prodigiosa inspiración, el poeta épico podía relatar cómo actuaron los héroes de antaño, y así sabía también cómo los dioses se lanzaron a intervenir en tal o cual momento, y, más allá, cómo en un principio nacieron los mismos dioses y se conformaron las cosas. Las Musas suministraban la información por encima de los siglos, con su saber eterno. Tanto Homero como Hesíodo saben invocarlas en el debido lugar. Hesíodo nos relata –al comienzo de su *Teogonía*– cómo se le aparecieron cuando él pastoreaba en el monte Helicón y le confiaron su misión poética.

La invocación a la Musa ha devenido luego un cliché poético, pero no debemos dudar de la sinceridad con la que los primeros poetas griegos hablan de esa experiencia religiosa y personal. En Grecia, el adivino ("que sabe lo que fue, lo que es y lo que será") es un profesional distinto del aedo; éste no tiene tampoco relación con los sacerdotes. Es un profesional del canto poético y también de esa memoria especial que patrocinan las Musas. El poeta místico y profético, sacerdote y cantor, como el vate o los druidas de otros pueblos, no es habitual en la Grecia que conocemos.

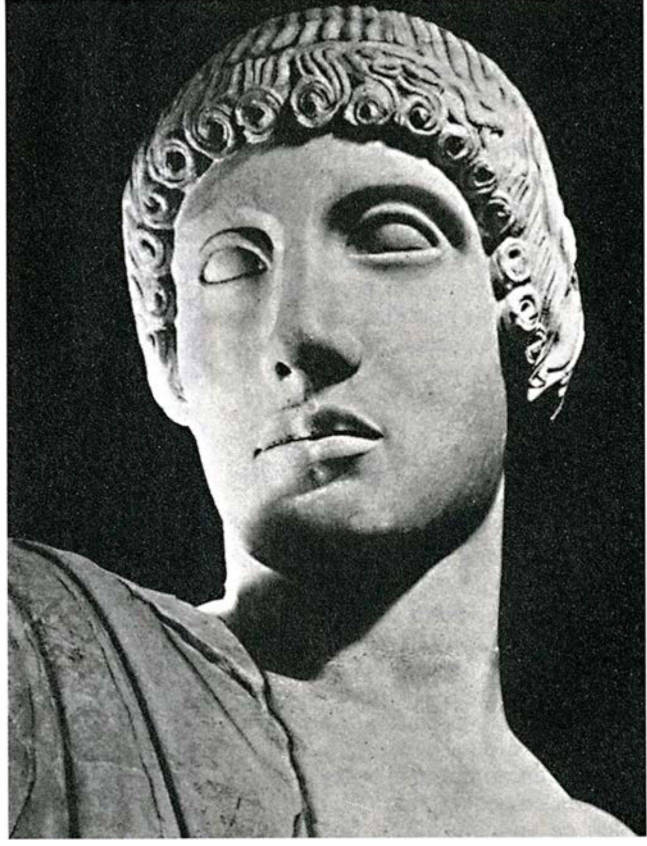
Desde la época homérica, el poeta es un *demiurgós*, un profesional artesano al servicio del pueblo, que eso es la traducción literal del vocablo griego, que goza de un singular prestigio por su saber del pasado mítico, gracias al auxilio y la inspiración de las Musas. (Pero ya Hesíodo apunta una nota crítica: las Musas le dijeron que sabían inspirar no sólo verdades, sino también mentiras, a su gusto. Así se insinúa un trazo muy helénico de desconfianza y de recelo: los dioses pueden engañar y mentir, si les parece oportuno. Hesíodo da así una puntada contra otros aedos menos fiables que él, tal vez contra el gran Homero, sin mencionarlo.) El poeta es, por tanto, un "maestro de la verdad", porque él es el portavoz y el intérprete de las Musas, su auténtico *prophetés*, que decía Píndaro en el siglo v a. C.

El saber mitológico no estaba encomendado a una casta sacerdotal ni a unos inflexibles, sino a esos poetas, maestros inspirados, versátiles, y que recogían tradiciones diversas, en localidades distintas, prestando oídos a curiosas variantes, atentos a las preferencias de sus públicos. Porque, no lo olvidemos, todo el pueblo conoce los mitos y es la colectividad quien en su memoria los alberga; sólo que los poetas los configuran mejor en su palabra poética, con su magisterio sapiencial y su habilidad musical y retórica. Como expresó muy pertinentemente Heródoto (en su *Historia* II, 53), fueron Homero y Hesíodo quienes "crearon poéticamente una teogonía para los griegos, dando a los dioses sus sobrenombres, distribuyendo sus honores e indicando sus figuras". Aunque el historiador jonio habla de "teogonía", o genealogía de los dioses, se está refiriendo a lo que nosotros llamamos "mitología". (El término *mythología* no se usa en ese sentido hasta Platón.)

La afirmación de Heródoto no quiere decir que los grandes poetas



6. POSEIDON es hermano de Zeus, una gran divinidad, señor de los mares. Blande en sus manos el tridente con el que provoca tempestades y terremotos. Su animal predilecto es el caballo. Su culto estaba muy extendido y sus templos fueron muy numerosos, a lo largo de las costas griegas.



7. APOLO, hijo de Zeus y de Leto, hermano de Artemis, es el dios de la luz, de la serenidad y de la música, representando algunos de los trazos más nobles del espíritu griego. Sus santuarios más famosos eran los de Delfos y Delos. Patrocinaba las profecías y los viajes colonizadores.

épicos inventaran las figuras y atributos de los dioses, sino que ellos fijaron en sus poemas memorables —difundidos por toda Grecia y que muchos conocían de memoria— las características de cada dios, dentro del cuadro mitológico admitido. En este sentido, Homero y Hesíodo fueron la *Biblia* de los griegos. Sus poemas eran los textos de referencia general en cuestión de teología. Pero la tradición era más amplia y diversa. Junto a esos poemas había muchos otros, había también tradiciones locales sobre un dios o un héroe y perduraban variantes de las versiones que podríamos denominar "establecidas" de Homero y Hesíodo.

Por otro lado, no hay que olvidar que una obra poética está compuesta desde una determinada perspectiva. Así, la *Teogonía* hesiódica se propone relatar cómo se ha formado el mundo de los dioses y, de paso, también el mundo, ya que los dioses griegos son inmanentes a su naturaleza, de modo que el relato incluye también una cosmogonía, o explicación del origen del mundo. Mediante un esquema genealógico, Hesíodo nos expone, de forma ordenada, con un afán de síntesis y de sistema, el desarrollo del politeísmo helénico, dejando al final la descripción de los dioses de la familia olímpica, los hijos de Zeus, dioses de cuarta y quinta generación que eran las grandes figuras de la religión tradicional, los más preeminentes en los cultos de las ciudades griegas, junto a su padre, Zeus, que ocupa, como era de rigor, el centro del poema.

Homero, en la *Ilíada* y en la *Odisea*, refleja otro mundo divino, como correlato de su evocación heroica —la de unos días en el décimo año de la guerra de Troya y los avatares de un héroe peregrino, el versátil Ulises— desde una perspectiva muy distinta. Frente al didactismo de Hesíodo, Homero ofrece una imagen mucho más vivaz, y también más frívola de los dioses del Olimpo, sobre todo en la *Ilíada*. Dioses aristocráticos, que se mezclan en los asuntos heroicos, y especialmente en estos lances de guerra y gloria, que toman partido por unos y otros, que se pelean y bajan a auxiliar a sus protegidos humanos, y no siempre salen bien parados de esos trances. Esas figuras espléndidamente vivaces de los dioses homéricos son representativas de los primitivos dioses griegos, con paralelos en otras mitologías indoeuropeas. Así, Homero deja de lado a grandes dioses menos aristocráticos, como a Deméter, diosa campesina, y a Dioniso, dios del vino y la máscara. (Cuando Heródoto menciona a Homero, se refiere quizá también a los *Himnos* llamados *homéricos*, tradicionalmente atribuidos al poeta por excelencia de la épica, en los que sí tenemos relatos que celebran las manifestaciones de la diosa de Eleusis y de Baco.)

No es sólo la épica el género literario que se nutre de la rememoración de los mitos. Los dos grandes géneros poéticos de la lírica coral y la tragedia ateniense recuentan incesantemente esos mismos relatos. Hay diferencias de enfoque: frente a la narrativa épica, la lírica procede por alusiones e invocaciones puntuales, rápidas y fulgurantes. (El mejor ejemplo es la poesía de Píndaro.)

Las representaciones dramáticas del teatro trágico escogen ciertos episodios del repertorio heroico; pero, a la vez, interpretan los mitos, reflexionando sobre su lección desde una nueva conciencia del destino humano. Por eso los héroes del mito resurgen en la escena dionisíaca con una nueva dimensión, la dimensión trágica. No son sólo figuras gloriosas y ejemplares, sino, ante todo, seres problemáticos, destinados a la catástrofe por su propia grandeza. Así, sobre todo, los personajes de Sófocles (siglo v a. C.). Por ejemplo, el protagonista de su *Edipo rey* no es sólo el personaje mítico, el monarca parricida e incestuoso, sino también el patético mártir de la condición humana, el buscador de la verdad que se destruye en su inquisición.

La literatura occidental no sólo ha heredado los relatos y las figuras del repertorio helénico, sino también esa tradición que en la misma Grecia reflexionaba y reinterpretaba sus mitos. Cuando en la escena moderna se representa algún drama que retoma un episodio y unas figuras de esa mitología —por ejemplo, cuando Sartre, Anouilh, Giraudoux, Brecht o Müller componen un drama con figuras griegas—, se está continuando un método dramático que tuvo sus orígenes en el teatro trágico ateniense, en el siglo v antes de Cristo. Sólo que, como era de esperar, con el distanciamiento suele potenciarse la ironía en el tratamiento de las figuras y los conflictos. Pero no deja de ser admirable la capacidad del mito helénico para servir de base a todas esas antiguas y nuevas inquisiciones literarias.

Seré breve al referirme al segundo y al tercer punto señalados como rasgos de la transmisión de la mitología en Grecia. Los estudios sobre la oralidad y la escritura han aumentado tanto en los últimos años, que sería demasiado esquemático cualquier resumen de la cuestión que aquí nos propusiéramos. Gracias a los trabajos de Jack Goody, Walter Ong, Eric A. Havelock y otros, conocemos bastante bien cómo la transmisión oral afecta no sólo a la forma de las narraciones, sino a la misma conciencia cultural de un pueblo, y cómo la introducción de la escritura y el establecimiento de una "civilización escrita" significa un proceso revolucionario en el progreso mental y cultural. Nos limitaremos a observar cómo en la transmisión mitológica griega esa introducción de la escritura supuso una innovación no sólo en la técnica de poetizar el pasado —todavía Homero pertenece al mundo de la composición oral, con sus fórmulas y su temática tradicional—, sino en la manera misma de enfrentarse al fenómeno poético y al pasado mítico.

La afirmación de la personalidad individual en Arquíloco o la libertad en las versiones míticas que creó Estesícoro, los grandes líricos griegos del siglo vii a.C., estaban fundadas en que ambos componían por escrito y contaban ya con los escritos; no eran *aoidoí*, sino *poietaí*: no "cantores", sino "creadores". (Estesícoro en su *Palinodia* contó que Helena no había ido a Troya, raptada por Paris, sino que los dioses le engañaron con un doble de la bella reina de Esparta y por ese fantasma lucharon griegos y troyanos, mientras la genuina estaba en Egipto; una versión que dos siglos más tarde recogió Eurípides.) Al fijarse en la escritura el relato mítico, los poetas tienden a buscar la originalidad, ya que su función no se limita a recontar las historias de la tribu, sino que las recrean en una visión personal. En este marco "histórico", los mitos son censurados, criticados y recontados con una ironía que en una cultura oral sería impensable.

En cuanto a la eclosión y avance de una mentalidad crítica y racionalista en el ámbito griego, se trata de un proceso histórico muy conocido que tiene sus inicios en la Jonia del siglo vi antes de Cristo. En esas ciudades, comerciales, prósperas, de talante abierto, es donde el racionalismo florece con toda libertad; en Mileto, Efeso, Halicarnaso y Cos surgen los primeros filósofos, los primeros historiadores y los primeros escritores occidentales de medicina científica. Esa "aurora de la filosofía griega" representa la aparición de una visión del cosmos que está opuesta, en su mismo planteamiento, al pensamiento mítico. Para explicar los fenómenos del mundo real se recurre a la experiencia, la investigación, el cálculo, a la razón. Explicar la realidad es ya recurrir a principios generales y abs-

tractos, a ideas y datos comprobables, no a creencias ni relatos míticos. Se ha hablado de la ilustración griega como un tránsito desde el mito al logos. (*Vom Mythos zum Logos* es el título de un famoso estudio de Wilhelm Nestle.)

Hay una oposición entre esos dos términos: *mythos* es el relato tradicional y fabuloso, que explica mediante un cuento con personajes extraordinarios e imágenes dramáticas; *logos* es el razonamiento que busca las causas de las cosas mediante la explicación de su producción natural, sin intervenciones maravillosas. El mito se opone no sólo al logos, sino también a la *historía*, término éste que, en griego, significa investigación, "saber por haber visto" —pensemos en la *Historia* de Heródoto y en la *Historia de los animales* de Aristóteles—, y se refiere ante todo al presente. Tanto el *logos* como la *historía* son saberes críticos y que dan razón, mientras que el mito es imposible de demostrar, es fantástico y objeto de creencia; algo que se cuenta, pero que nadie ha visto. En esa ambiente racionalista, "los ojos resultan testigos más exactos que los oídos", según dijeron los presocráticos Heráclito y Heródoto. Ya no se acepta la explicación de los mitos, sino que es la investigación racional el camino para buscar la verdad y esa naturaleza de las cosas, la *physis* oculta bajo las apariencias engañosas, esa naturaleza que "gusta de ocultarse" (Heráclito).

Los filósofos presocráticos se interrogaron acerca del fundamento del mundo y proponían un *arché*, un principio único: Tales, el agua; Anaxímenes, el aire; Anaximandro, lo indefinido; Heráclito, el fuego. No importa el acierto en su respuesta; sí que no recurrieran ya a ningún ser mítico ni a ningún relato mítico en esa búsqueda. Buscaban una causa física mediante un razonamiento general. También los primeros historiadores y los médicos hipocráticos prescindieron de los mitos en sus investigaciones y explicaciones. Esta brillante etapa inicial del racionalismo es lo que alguna vez se llamó "el milagro griego", aunque esa denominación ha caído en desuso porque se trata de un hecho histórico cuyos condicionamientos socioculturales nos parecen claros y que, por otro lado, tampoco nos parece un brusco corte con respecto a su pasado.

De todos modos hay que resaltar que, desde esa época, existe una crítica a los mitos (en presocráticos como Jenófanes y Heráclito, por ejemplo), y pronto aparecen los intentos de justificar a los mitos frente a la razón como "ficciones alegóricas". (El primer alegorista es Teágenes de Regio, ya en el siglo VI, contemporáneo, pues, de algunos presocráticos.) Ese enfrentamiento de lo mítico y lo racional resulta complejo, y la victoria de la razón no es tan sencilla ni tan definitiva como pudiera pensarse desde una óptica anacrónica. La pregunta de si creían los griegos en los mitos depende mucho de la época, la formación cultural y del sentido de lo que entendamos por "creer", acto humano nada simple.

Es impresionante observar cómo Eurípides critica a los dioses por su actuación mítica, a la vez que compone las tragedias en que ese trasfondo divino es totalmente necesario para el sentido pleno de la trama. Y no es menos sugerente observar cómo el mayor filósofo ateniense, Platón, recurre a los mitos —recreados por su imaginación— para dar una imagen de los temas esenciales de su filosofía: la estructura del alma y su destino, el origen y fin del universo, o la ambigüedad del impulso erótico.

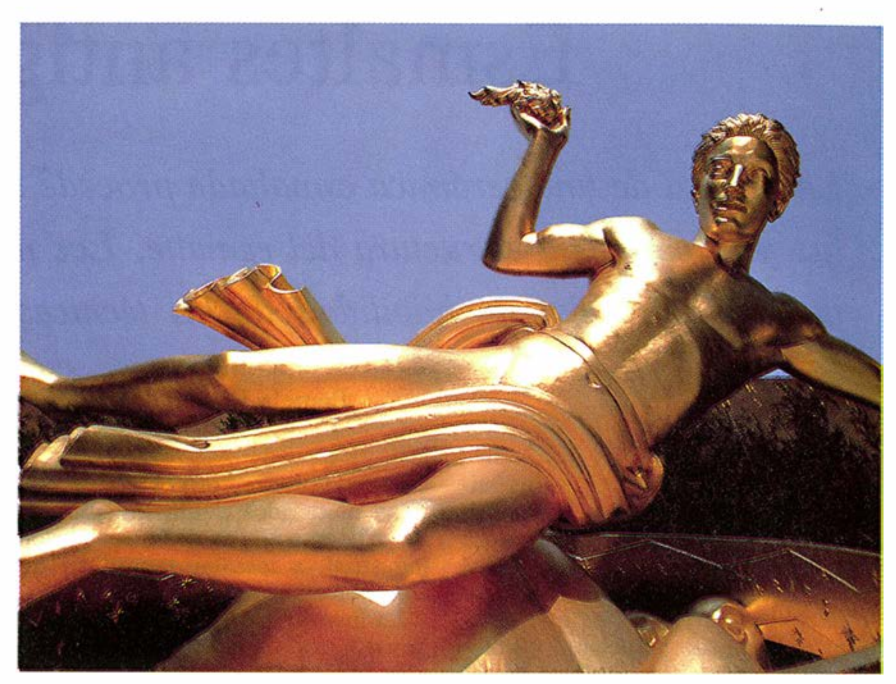
Toda la cultura griega está permeada por la mitología. Tal vez la desconfianza en los héroes y la crítica de los mitos arruinó el género trágico a fines del siglo V a. C., como opinaba Friedrich Nietzsche; pero el mito siguió ofreciendo los temas básicos de la poesía y el arte griego hasta el final



8. HERMES es el dios de las comunicaciones, del comercio, y también de los ladrones; constituye asimismo el guía de las almas en el Hades. En la mitología romana recibiría el nombre de Mercurio.

del paganismo. Los pintores, ceramistas y escultores helénicos no cesaron nunca en sus ilustraciones de temas y motivos mitológicos, desde la época arcaica hasta el arte alejandrino del período romano. Esas escenas mitológicas son el fundamento de toda la iconografía clásica. En pinturas y relieves, en frisos y en metopas y en la panza y los bordes de los vasos pintados, aparecen los mismos dioses y héroes de los mitos, en escenas que aluden a conocidos episodios, acaso reproduciendo alguna descripción literaria o una escena famosa, acaso producto de la fantasía del artista.

La abundancia de esos motivos y de esas imágenes caracteriza a los mitos griegos, y ése es también un legado evidente a nuestro arte occidental. Incluso en la Edad Media hay pervivencias de los mitos griegos (ya heredados por los romanos, que en este aspecto constituyen una prolongación marginal de lo helénico); pero fue en el Renacimiento cuando los dioses y héroes recuperaron su traza e imagen original. Ni los clasicismos, ni los romanticismos han apurado esos personajes fabulosos y sus historias fantásticas. Las *Metamorfosis* de Ovidio es uno de los libros más influyentes en el arte occidental, por esa profusión de mitos, entrelazados con sus poéticas descripciones. Pero, por encima de los textos y de la belleza de los poemas, está la influencia de la antigua mitología, ya no objeto de creencia, sino repertorio literario y artístico. Pues la tradición cultural europea es sólo una prolongación de la helénica, incluso en un proceso de desmitificación filosófica, incluso en ese recontar los mitos con una ironía como la que vemos en Ezra Pound o en James Joyce.



9. PROMETEO EN NUEVA YORK. El mito del Titán filántropo, que robó el fuego celeste para dárselo a los humanos, tuvo en la literatura griega famosas versiones. Fundó el sacrificio y con el fuego introdujo el progreso en las artes al servicio de los hombres. Como portador de esa antorcha —fuego, luz, base de todo el progreso futuro— se le recuerda en esta imagen áurea, de Nueva York.

Conviene, para concluir, resaltar un trazo singular de la mitología helénica frente a las de otros pueblos. No ha sido fijada de una vez por todas en una investigación antropológica, sino que queda expuesta por una literatura de más de mil años. No hay una versión de narraciones míticas, sino reinterpretaciones de distintos momentos de esa tradición literaria. La reflexión, la interpretación en sus variadas formas, desde el alegorismo, incluso la parodia de los mitos griegos, no han comenzado en el distanciamiento de la modernidad, sino en la misma tradición clásica.

Pongamos un ejemplo. El mito de Prometeo es uno de los más profundos y ricos de sentido, porque expone el origen de algunos temas centrales de la cultura: la posesión del fuego, robado por el Titán del cielo, la configuración del sacrificio ritual, en el que los huesos, la grasa y la piel de la víctima animal se quemaban en honor de los dioses y las carnes asadas se las repartían los humanos, y la creación de la primera mujer, Pandora, que introdujo en su ánfora las calamidades de la existencia. El mito está cargado de elementos simbólicos.

Tenemos tres relatos clásicos del mismo: en Hesíodo (en su *Teogonía* y en *Trabajos y días*), en el *Prometeo encadenado* de Esquilo y en *Protágoras*, diálogo platónico que recoge el discurso donde ese sofista lo expone. Son versiones diversas y cada una de ellas enriquece la tradición mítica al ofrecer una imagen distinta de Prometeo. Para el poeta épico se trata de un dios antiguo, demasiado astuto, un *trickester*, que pretende en vano engañar a Zeus y recibe su castigo, aportando un ambiguo beneficio a los humanos. Para Esquilo es el gran filántropo, rebelde contra un Zeus déspota, el introductor del progreso con el rapto del fuego —instrumento no sólo culinario, sino, sobre todo, metalúrgico—. Para Protágoras y Platón es el fundador del progreso técnico, pero ese es un proceso insuficiente por sí mismo para la convivencia civilizada, y hace falta que Zeus acuda luego a completar su obra mediante la entrega igualitaria a los humanos de la justicia y el sentido moral. El sofista utiliza el mito para exponer sus ideas sobre el fundamento de la democracia. Algo que no habría pensado nunca Esquilo, ni tampoco, siglos antes, el sabio Hesíodo.

Hay muchas imágenes diversas de Prometeo en la literatura moderna, desde el romanticismo que encontró en ese mito un profundo simbolismo. Desde Shelley y Goethe a Karl Marx, Prometeo, "el primer santo en el calendario del proletariado", ha servido de estandarte de nuevas ideas, inquietudes y rebeldías, como una imagen del progreso humano, lanzado a la conquista del porvenir mediante el esfuerzo y la técnica.

En el corazón de Nueva York, en el Centro Rockfeller, una imponente estatua de Prometeo, volando con su antorcha en la mano, resulta una última interpretación del astuto Titán. Ahí está, rejuvenecido y ágil, atlético y áureo (o mejor, dorado), no ya el viejo y trapacero Titán, sino un luminoso heraldo del progreso en una imagen bien adaptada a la mentalidad norteamericana. El viejo protagonista mítico se ha puesto otro nuevo disfraz, pero todavía lo reconocemos, como lo habrían hecho Hesíodo, Esquilo, Platón y cualquier griego antiguo, emblema helénico a la sombra de los rascacielos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LA MITOLOGÍA. INTERPRETACIONES DEL PENSAMIENTO MÍTICO. Carlos García Gual. Editorial Montesinos; Barcelona, 1987.

APPROACHES TO GREEK MYTH. Dirigido por Lowell Edmunds. The Johns Hopkins University Press; Baltimore-Londres, 1990.

Esmaltes antiguos

La belleza de una cerámica esmaltada procede de la interacción entre la luz y la compleja estructura del esmalte. Los métodos de la ciencia de materiales revelan la habilidad de las técnicas antiguas de esmaltado

Pamela B. Vandiver

Llamamos esmalte al revestimiento vítreo que sella y adorna la superficie de una pieza cerámica. Los esmaltes industriales modernos son, con frecuencia, incoloros y transparentes (los que recubren un plato de porcelana) o coloreados y opacos (los azulejos de un cuarto de baño). Pero una visita a un museo de arte revelará que los esmaltes cerámicos abarcan un repertorio, muy rico, de efectos visuales. Los esmaltes de faenza azul sobre los antiguos amuletos egipcios brillan todavía con la intensidad del día en que salieron del horno. Escenas registradas en esmaltes de color rojo y negro llenan de vida las superficies de los jarrones griegos. Brillantes esmaltes de plomo tricolores, luminosos esmaltes verde mar y deslumbrantes porcelanas hablan del gusto y poder de la corte imperial china.

Con mucha anterioridad a los tintes sintéticos y plásticos, los esmaltes cerámicos ofrecieron a los artistas una diversidad incomparable de colores y texturas permanentes, que podían adaptarse para satisfacer distintas demandas culturales. En muchas culturas, las cerámicas esmaltadas fueron artículos de gran prestigio; lejos del alcance del pueblo llano, pues los materiales necesarios, los conocimientos y la destreza en la manufactura resultaban, con frecuencia, difíciles de adquirir. En la Europa de los siglos XVI y XVII, los monarcas coleccionaron porcelanas chinas con tal avidez que, algunas veces, arriesgaron con ello la quiebra de sus haciendas. El apetito europeo por este "oro blanco" arrastró a destacados científicos, durante las primeras etapas de la revolución industrial, a intentar reproducir dichas porcelanas.

La investigación cerámica se dirige hoy a la explotación práctica más que a las posibilidades artísticas de la cerámica [véase "Nuevas cerámicas", por H. Kent Bowen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1986]. Al propio tiempo, las herramientas y estrategias de la moderna ciencia de materiales han catapultado el estudio de las cerámicas antiguas hacia una nueva era. Los científicos estudian el procesado de materias primas para crear estructuras microscópicas que doten a las cerámicas de las deseadas propiedades macroscópicas, tales como la capacidad de resistir tensiones o temperaturas extremas. Los expertos en cerámicas antiguas abordan el problema en el sentido opuesto: empezando por un objeto acabado, buscan descubrir las estructuras que dan lugar a sus propiedades y reconstruir los materiales y procesos a partir de los cuales se creó.

En nuestro laboratorio hemos estudiado el desarrollo tecnológico de esmaltes antiguos, que no ha recibido la misma atención que las propias piezas cerámicas. Investigando el contexto arqueológico y la utilidad de un esmalte antiguo, analizamos su composición y estructura y, por último, intentamos reproducirlo. Con ello esperamos la respuesta a múltiples cuestiones: ¿cuál es la base física de la morfología de un esmalte?, ¿qué materias primas deben utilizarse y cómo modifican el esmalte?, ¿qué secuencia de etapas eligieron los alfareros para desarrollarlo?, ¿cómo se perfeccionaron estos procesos para producir el efecto deseado? Las respuestas a tales preguntas ofrecen un escaparate muy bien surtido de la mentalidad de los antiguos ceramistas y de los valores por los que se regían las sociedades en que trabajaron.

Las cerámicas están hechas de arcilla, constituida principalmente de pequeñas partículas —menores de 10 micras— de aluminosilicatos, que son los minerales más abundantes en la corteza terrestre. Las partículas, de tipo aplanado, están apiladas en capas, que ofrecen estrechos intersticios donde se introduce el agua, creando fuerzas de atracción que mantienen unidas las partículas y permiten el deslizamiento de una sobre otra; en virtud de ello la arcilla admite la deformación plástica.

En la cocción de las arcillas, las partículas sinterizan, es decir, funden lo justo para formar un "adhesivo" vítreo, que convierte a las partículas enlazadas en una masa dura como una roca. La cerámica permanece, sin embargo, algo porosa, porque la arcilla no se calienta tanto como para llegar a la fusión completa; si ello se produjera, la estructura se colapsaría. Por eso, la pieza, porosa, se sella con un esmalte. Los esmaltes suelen constar de pequeñas partículas generadoras de vidrio que se funden para formar una capa de vidriado impermeable sólo tras una corta cocción a una temperatura relativamente baja, que mantiene la forma de la pieza cerámica.

Quizá la mejor manera de aclarar los comportamientos fundentes de cerámicas, vidrios y esmaltes sea contrastándolos con el de un cristal. En éste, los átomos se hallan ordenados en una disposición tridimensional. La fuerza de enlace entre tales átomos en un cristal es uniforme. Por consiguiente, cuando un cristal se calienta, los átomos vibran en unas posiciones fijas de la estructura hasta que se alcanza el punto de fusión, cuando la energía térmica provoca una brusca disgregación en un estado líquido, más desordenado. Por su parte, el vidrio contiene impurezas, los flujos, que interrumpen la disposición y generan un retículo aleatorio, parecido a la estructura de un líquido. A causa del ordenamiento aleatorio y la varia-

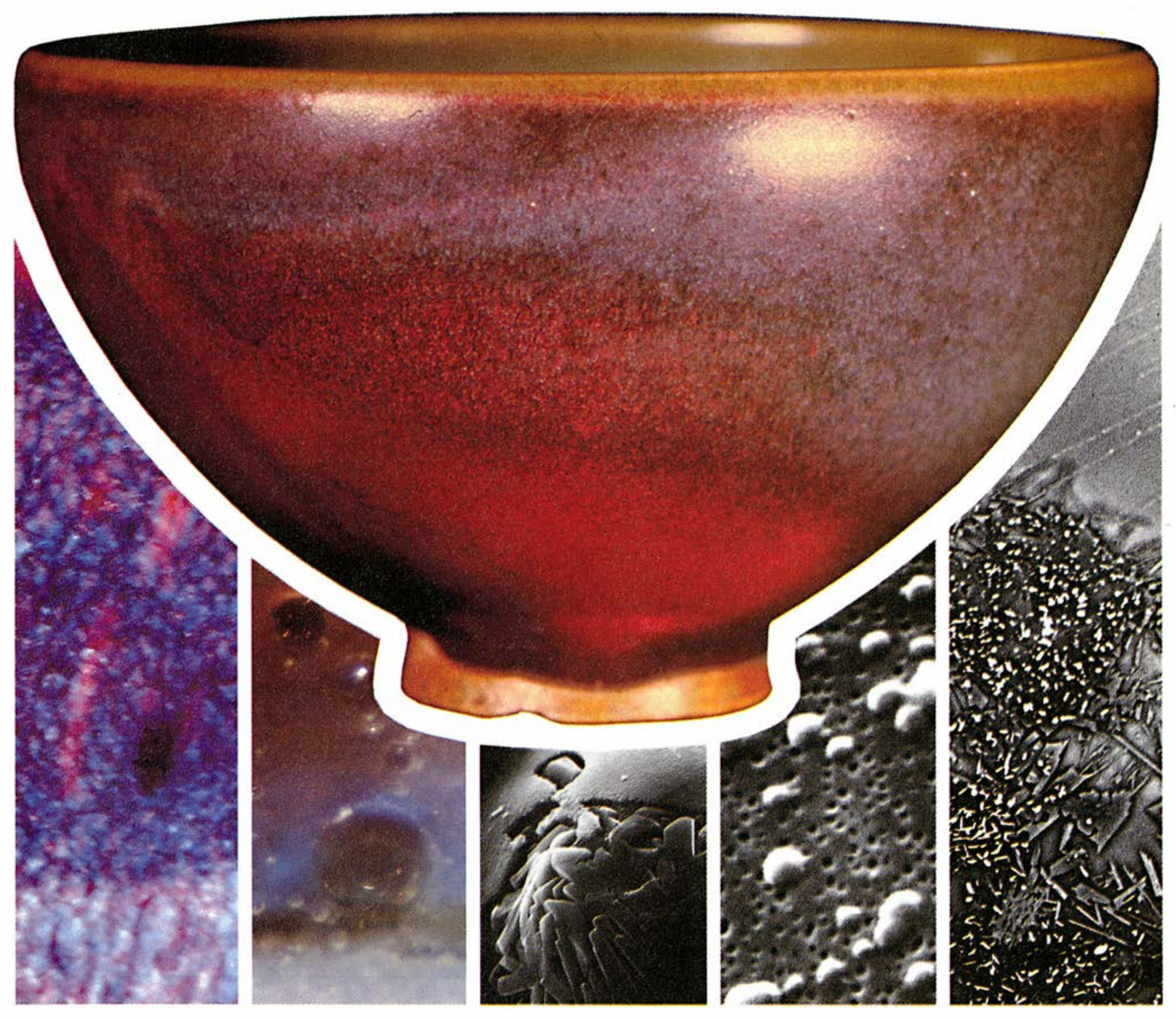
PAMELA B. VANDIVER, experta en antropología y bellas artes, es investigadora en cerámicas adscrita al laboratorio analítico de conservación de la Institución Smithsoniana. Recibió el doctorado en ciencias de los materiales por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, tras una dilatada experiencia anterior en la artesanía del vidrio.

bilidad de las fuerzas de enlace, los vidrios no poseen un punto de fusión definido. Cuando un vidrio se calienta, se disuelve gradualmente, y su consistencia sólida va cediendo paso a una consistencia, primero, de mantequilla, luego como la de la miel y, por último, como la de un jarabe. Por incorporación de impurezas que posean distintas fuerzas de enlace, se puede manipular el punto de fusión y la estabilidad de un vidrio o esmalte.

A pesar de que vidrios y esmaltes se realizan con las mismas materias primas —arena de sílice, cal, potasa, bórax y óxidos de plomo—, hay importantes diferencias entre ellos. En la fabricación del vidrio, éste debe mantenerse en estado de fusión durante largo tiempo, días a veces, para asegurar la fusión de todas las materias primas, que no se formen cristales y que el aire retenido escape en forma de burbujas, o reaccione en el interior del vidrio. El esmalte, en cambio, no puede mantenerse a alta temperatura, puesto que la pieza cerámica podría iniciar también la fusión.

Como los esmaltes permanecen breve tiempo a temperatura elevada, retienen a menudo impurezas, verbigracia, materias primas cristalinas sin fundir o burbujas de gas. A esas impurezas se debe la drástica alteración de la apariencia del esmalte: el que es claro se presenta translúcido u opaco, provocando que una superficie de suyo lisa adquiera texturas satinadas, aterciopeladas o incluso enharinadas, y mutando la superficie óptica plana en otra que ofrezca una impresión de profundidad, como un jade o un ágata.

El aspecto de un esmalte, su apariencia, es resultado de las interacciones entre la luz, por un lado, y, por otro, la superficie externa del esmalte, la interfase entre éste y la pieza subyacente y la propia constitución del esmalte. Especial interés reviste su microestructura. Estructuras entre 0,1 y 1 micra están cerca de las longitudes de onda del espectro visible y, por ello, influyen decisivamente sobre las propiedades ópticas y el aspecto externo de un esmalte. Los tamaños en torno a las 100 micras se hallan justamente en el límite de reso-



1. ESMALTE OPALESCENTE sobre un recipiente Jun, ejemplo del refinamiento alcanzado en la dinastía Song (960-1279 d.C.). En una moderna réplica de un esmalte Jun (*izquierda*), hay zonas con cristales de cobre que forman una constelación de puntos rojizos sobre un fondo azul. Una sección del esmalte, aumentada en 60 veces, pone de manifiesto burbujas que reflejan la luz (*segunda por la izquierda*). Los cristales de cristobalita indican que el esmalte se calentó durante largo tiempo y se enfrió lentamente (*centro*). Algunas gotículas de la emulsión de esmalte fueron atacadas por ácido, dejando un relieve alveolar; las esferas blancas son cristales de pseudowollastonita, que confieren al esmalte un aspecto nebuloso (*segunda por la derecha*). Las acículas de anortita desarrolladas entre el esmalte y el cuerpo cerámico forman una blanca capa que refleja la luz (*derecha*).

lución del ojo humano y contribuyen también a sutiles efectos texturales.

La luz se refleja limpiamente en una superficie lisa esmaltada (reflexión especular) y es difundida por las superficies rugosas. El esmalte mate contiene cristales que confieren relieve a la superficie y difunden la luz en todas direcciones. La superficie de los esmaltes Longquan, color verde celadonita, de la dinastía Song, es ligeramente rugosa, posee cristales de cuarzo entre 10 y 100 micras y combina efectos de reflexión difusa y especular de la luz. Distintas composiciones de esmalte reflejan y absorben cantidades variables de luz. Un esmalte calcosódico refleja cerca del 4 por ciento de la luz incidente, mientras que un esmalte de plomo refleja cerca del 8 por ciento, dando una mayor sensación de brillo. Los elementos pesados incrementan el índice de refracción y la reflectancia de un esmalte.

En un esmalte transparente o translúcido, la luz se absorbe, se difunde o se refleja en la interfase entre el esmalte y la pieza. Un objeto cerámico blanco y liso reflejará una gran cantidad de luz que realzará los colores del esmalte, mientras que una pieza oscura absorberá más luz provocando que el esmalte parezca oscuro. En los esmaltes verde celadón, crecen cristales de anortita, silicato de calcio y aluminio, en la interfase durante la cocción; los blancos cristales enmascaran la pieza cerámica gris y hacen que el esmalte verdeazulado se nos ofrezca con un brillo intenso.

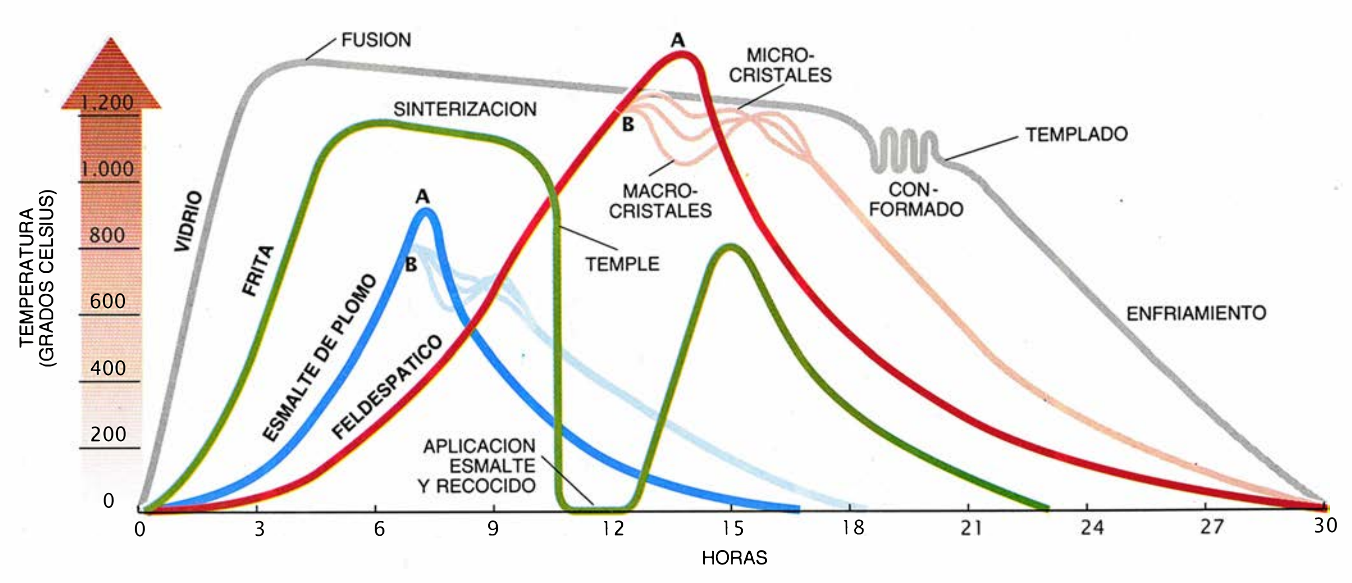
En el interior del propio esmalte se generan múltiples y complejos efectos ópticos. Los más evidentes son las interacciones que lo colorean. Y la técnica más sencilla y segura de coloración consiste en añadir un pigmento, magnetita negra u óxido de cobre rojo por ejemplo. Mayor complejidad encierran los colores coloidales, como partículas microscópicas de oro, plata o cobre; las partículas producen color por absorción, difusión y refracción.

Los colores más interesantes y sutiles, sin embargo, se producen por un tercer método: una solución de iones de metales de transición, con electrones externos que absorben totalmente ciertas longitudes de onda de la luz. Estos iones comprenden el hierro (del que resulta una gama de colores, desde el amarillo o verde hasta el marrón o negro), el manganeso (púrpura a marrón), el cromo (rosa a verde), el cobalto (azul) y el cobre (de verde a azul), según la concentración y el estado de oxidación. Estos colorantes pueden resultar engañosos en su uso, puesto que la energía de sus electrones externos se halla estrechamente condicionada por los elementos circundantes. De aquí que el cobre sea azul en un esmalte alcalino y verde en otro de plomo. Si se añade un 0,5 por ciento de óxido de hierro a un vidrio o esmalte alcalino, cada ion de hierro queda rodeado por átomos de oxígeno y el modelo de absorción resultante da un color verde botella. Si los iones de carbono o de azufre sustituyen uno o más oxígenos, resultará un color marrón, puesto que los pares hierro-azufre o hierro-carbono absorben más luz del espectro.

Las burbujas de aire interfieren también con la luz a través del esmalte. Burbujas que podrían formarse cuando las bolsas de aire atrapado se expanden con el calor o se agregan en partículas durante la fusión, y cuando las sales presentes en la materia prima se descomponen y liberan gases. Si se deja que el esmalte funda en un claro estado fluido, muchas burbujas alcanzarán la superficie y escaparán. Pero si el esmalte permanece viscoso, las burbujas quedan retenidas como las vesículas de aire de la piedra pómez. Un gran número de diminutas burbujas abrillantan un esmalte porque las lisas interfases aire-vidrio ofrecen muchas superficies de reflexión.

Además de los colorantes y burbujas de aire, en el esmalte importa también la presencia o ausencia de partículas cristalinas. Si un esmalte o vidrio tiene hasta un 0,5 por ciento en volumen de finas partículas inferiores a una micra, aparece translúcido, no transparente. Si la concentración supera el 10 por ciento, el vidrio o esmalte es opaco. Los cristales pueden poseer un índice de refracción superior al del vidrio que los rodea, desviando los rayos de luz que atraviesan un cristal y realizando así un recorrido mayor a través del esmalte, con una sensación de mayor profundidad. Si el índice de refracción del cristal es mucho mayor que el del vidrio, la luz se desvía un ángulo tan grande que el esmalte se torna opaco del todo.

Durante milenios, los artistas han sabido explotar estas variaciones estructurales para crear una asombrosa colección de efectos visuales, incluidos los que imitan piedras y



2. ILUSTRACION DE LA HISTORIA TERMICA de vidrios, fritas y dos esmaltes típicos. El vidrio se mantiene a alta temperatura para fundir impurezas y desalojar burbujas; mientras se conforma, puede recalentarse varias veces. La frita se sinteriza (fusión parcial) a alta temperatura, se enfría a continuación en un brevísimo lapso de tiempo, se convierte en polvo, se aplica como un esmalte y se recalienta a baja temperatura. Los esmaltes de plomo y los feldespáticos se mantienen brevemente a la temperatura máxima (*A*). A fin de obtener transparencia, el esmalte se enfría ligeramente (*B*) para nuclear cristales y se mantiene luego a alta temperatura cierto tiempo, con el propósito de dejar desarrollarse los cristales.

ESMALTE DE PLOMO

REFLEXION ESPECULAR

REFLEXION DIFUSA

ESMALTE MATE

REFLEXION DIFUSA

ESMALTE CELADON

REFLEXION ESPECULAR

REFLEXION DIFUSA

3. INTERACCION DE LUZ a tenor de los esmaltes de que estemos hablando. El de plomo (*izquierda*) es transparente, con elevada reflexión. Un esmalte mate (*centro*) tiene inclusiones cristalinas en la superficie, razón por la cual difunde la luz. El esmalte verde mar (*derecha*) contiene partículas de cuarzo, burbujas y microcristales, lo que desvía y difunde la luz. Una capa cristalina en la interfase esmalte-cerámica refleja también la luz.

metales preciosos. Las cerámicas podían realizarse plásticamente, por lo común con menos esfuerzo que los materiales nobles, y adoptar mayor diversidad de formas y tamaños que los metales o rocas. Estas posibilidades elevaron las cerámicas esmaltadas por encima de la funcionalidad vulgar hasta la categoría de utensilios de lujo refinado. Para satisfacer a sus clientes, los artistas desarrollaron un notable ingenio en la manipulación de los esmaltes. Los cerámicos ofrecen, por ello, una excepcional panorámica de las técnicas de la antigüedad y su imbricación en los valores culturales.

Los primitivos esmaltes del Nuevo Mundo, Sudeste asiático y China eran simples engobes: suspensiones de partículas de arcilla muy finas en agua, a veces con una adición de ceniza o una sal. La cocción se realizaba a baja temperatura, entre 600 y 1000 grados, y por un corto período de tiempo. Sólo fundían parcialmente y por ello permanecían permeables.

Unos 5500 años a.C., los ceramistas del norte de Mesopotamia descubrieron que el color de una arcilla tras la cocción podía controlarse ajustando la atmósfera del horno. El agente variable es el óxido de hierro, una impureza abundante en las arcillas para loza. Una atmósfera del horno rica en oxígeno mantiene el óxido de hierro en forma de hematites roja (Fe_2O_3); una humeante atmósfera pobre en oxígeno reduce el óxido de hierro en magnetita negra (Fe_3O_4). Ambas condiciones se alcanzan en hornos y muflas sencillos; así, en cuanto la gente observó los efectos colorantes, aprendió a manipular la cocción para alcanzar sus propósitos.

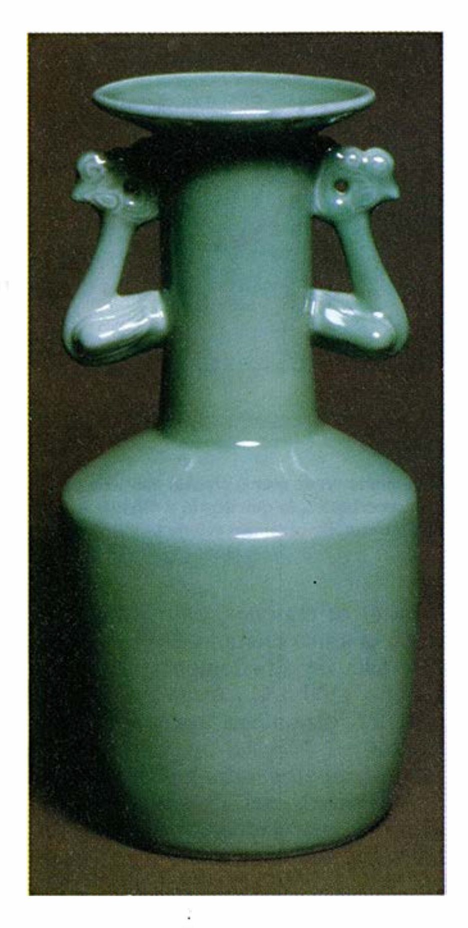
Las cerámicas decoradas con engobes alcanzaron su apogeo en los jarrones griegos del siglo VI al II a.C. Las arcillas illíticas mezcladas con agua no se utilizaban hasta que las partículas gruesas no hubieran sedimentado. Las finas partículas de arcilla y hematites permanecían en suspensión y eran decantadas. Con esta suspensión se pintaban las áreas a ennegrecer. Se cocían las piezas en atmósfera reductora hasta que el óxido de hierro de toda la superficie se reducía, adquiriendo un color negro. En el proceso, las finas partículas del engobe sinterizaban dando una superficie satinada, mientras que las partículas mayores de la pieza permanecían bastante sueltas. Al final de la cocción y durante el enfriado, se introducía oxígeno en el horno, para provocar que sólo las áreas de arcilla porosa expuestas se reoxidaran y adquiriesen un color rojo. Por otra parte, muy poco oxígeno podía difundirse entre el engobe sinterizado, y así las áreas esmaltadas permanecían negras.

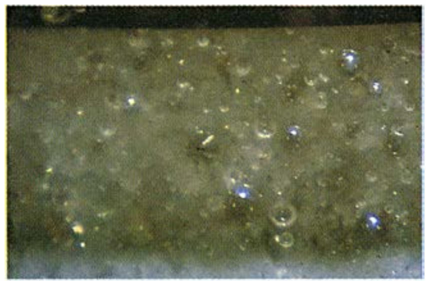
Los engobes de procedencias diferentes eran variantes de este tipo general y compartían un mismo defecto: su permeabilidad excesiva. Hemos encontrado una notable excepción a esta regla en un objeto procedente de Godin Tepe, en el oeste de Irán. Conocido como cerámica pintada de Seh Gabi, datada en 3500 años a.C., se realizó en arcilla calcárea de color crema y decorada con un esmalte negro satinado. Nuestros análisis mostraron que el esmalte poseía la composición de un engobe, aunque cocido a mayor temperatura (1050 grados) y por un tiempo mayor que la propia pieza, cocida a 800 grados. Ello sólo pudo darse si el esmalte se había precocido a alta temperatura, molturado posteriormente, mezclado con agua, aplicado a la pieza de arcilla y recocido a una temperatura inferior. Dicha técnica tuvo una corta duración; ni siquiera se transmitió a posteriores generaciones, ni se expandió a otras regiones. Seh Gabi constituye el único ejemplo de un esmalte de arcilla de alta temperatura antes del año 1500 a.C., fecha en que los esmaltes cerámicos aparecieron en China.

Los primeros esmaltes auténticamente vítreos del Próximo Oriente fueron desarrollados por los orfebres antes que por los artesanos ceramistas. Nos estamos refiriendo a las faenzas egipcias de lapislázuli y turquesa. Unos 4000 años a.C., los artesanos de la pedrería descubrieron que podían crear un material casi pétreo por prensado de una pasta arenosa de residuos de cuarzo molido, un fluido sódico o sódico-potásico, un poco de malaquita o caliza molturadas y agua, con posterior secado y cocción suave. Se añadía una sal de cobre a la pasta, que, junto con los otros componentes, podía eflorecer en la superficie; durante la cocción, la eflorescencia podría fundirse y formar un translúcido revestimiento vítreo azulado. Un segundo método, conocido desde unos 2300 años a.C., consistía en la cocción de objetos de cuarzo enterrados en un polvo de sales de cobre, cal viva y carbón vegetal; las sales se vaporizan y funden sobre la superficie para crear el esmalte. Esta técnica se utiliza todavía en Irán para hacer cuentas. Los artesanos de faenzas desarrollaron también un tercer grupo de técnicas que fritaban los esmaltes, los pulverizaban y los aplicaban a piezas de cuarzo.

La historia tecnológica de habilidad tan importante en Egipto es compleja, sobre todo en sus etapas primitivas. Tal como se expandía —o era reinventada— la técnica hacia otras regiones del Próximo Oriente, se producían diferencias técnicas de una zona a otra y, también, entre los objetos atribuidos a un mismo taller.

Alrededor del año 1500 a.C., los







4. JARRON LONGQUAN del siglo XII. Se le considera una de las cerámicas más finas que se hayan elaborado jamás. Burbujas y partículas de cuarzo, como puede verse en la sección transversal (*superior derecha*), confieren luminosidad y profundidad al esmalte. El matiz verde mar procede del ligero estado de reducción del hierro en solución. La fotografía al microscopio electrónico de barrido (*inferior derecha*) revela la presencia de partículas de cuarzo y acículas de anortita, que se caracterizan por difundir la luz.

artistas egipcios iniciaron la fabricación de grandes cantidades de cuentas de vidrio y vasijas. Comenzaron a incorporar polvo vítreo en piezas de cuarzo para crear decorativas incrustaciones en el menaje y la arquitectura. Esta expansión desarrolló la gama de colores desde los tradicionales verdeazul, púrpura oscuro, marrón y negro, hasta abarcar el amarillo, verde mar, azul cobalto, violeta y naranja. Los objetos de la época romana revelan que los egipcios aplicaban estas fritas para colorear aderezos de arcilla de color tostado; estos esmaltes vítreos y apagados carecen de la calidad y función ornamental de la faenza.

Interesa destacar que los esmaltes prefritados (precocidos) se han reinventado en los tiempos modernos como una forma de eliminar burbujas y partículas no fundidas, entre otros defectos. Resuelven también el problema de la posible toxicidad de los esmaltes de plomo que, fundidos parcialmente, contienen óxidos reactivos que pueden disolverse en la alimentación ácida, de zumos de naranja por ejemplo. Un esmalte prefritado asegura la fusión completa de las partículas de plomo y su alojamiento en la estructura de un vidrio silicatado.

La tradición de orfebrería y fabricación de faenzas en el Próximo Oriente desarrolló una técnica de esmaltado distinta de los engobes; ofrecía una amplia gama de colores y un brillo intenso. Por razones históricas y culturales, faenzas, fritas, vidrio y esmalte se reservaron para la imitación de piedras preciosas y decoración arquitectónica, al alcance exclusivo de las clases dirigentes. Los esmaltes vítreos podían haberse desarrollado también para decorar e impermeabilizar loza, pero no eran necesarios para tales cometidos, porque bastaban otros métodos, así la decoración de engobe o los revestimientos de resinas impermeables.

Una razón de peso frenó el desarrollo de los engobes en el Próximo Oriente: las arcillas de la región son de tipo pirofilita, aconsejable sólo para cerámica de baja temperatura. Estas arcillas, difíciles de trabajar, se encuentran habitualmente en depósitos fluviales o capas de origen marino, muy heterogéneas en su composición. Las arcillas con dosis elevadas de carbonatos tienen pobres propiedades refractarias: si se cuecen a temperaturas entre 800 y 850 grados, se desmoronan fácilmente; aunque a 1000 grados sean más estables, se deforman, se hinchan y acaban por fundirse. Además, las estructuras del horno hechas con arcillas deficientes no pueden soportar repetidas cocciones a alta temperatura. La calidad de las materias primas, unida a las condiciones sociales e históricas, limitaron la técnica y la evolución conceptual de los artistas. Por ello, los esmaltes calcáreos de alta temperatura no aparecieron hasta la época romana.

En China, por el contrario, los ceramistas contaban con abundancia de excelentes arcillas refractarias y materiales que les capacitaban para elevar la técnica cerámica hasta la categoría de arte, al par de la pintura o escultura de Occidente. El análisis de los esmaltes chinos por nuestro laboratorio y por científicos chinos revela una innovación gradual y continua, que empleaba nuevos materiales para el esmaltado, cuyos procesos se creaban o refinaban para producir nuevos efectos visuales.

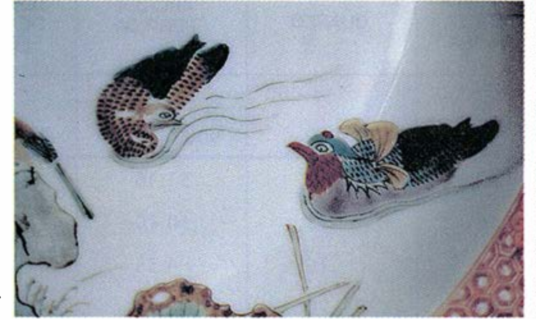
Las fuerzas motrices de innovación en la técnica china del esmalte fueron dos: la precoz adquisición de temperaturas de cocción superiores a 1000 grados y el hallazgo de esmaltes pétreos —minerales no arcillosos tales como calcita y "piedra china" (mezcla parcialmente alterada de arcilla sericítica y cuarzo) que podían utilizarse para confeccionar esmaltes de alta temperatura—. Hallaron una privilegiada ventaja de partida en la existencia de potentes yacimientos de loess, de centenares de metros de espesor en algunos lugares, que cubren buena parte de China. El loess está constituido, principalmente, por cuarzo; su elevado punto de fusión le convierte en excelente material para la construcción de hornos de alta temperatura. Para preparar uno de éstos bastaba allí con excavar una cámara en la ladera de una colina, taponar las paredes y abrir un respiradero a la superficie. Milenio y medio antes de Cristo, la cerámica se cocía entre 1100 y 1200 grados.

La idea del esmaltado pétreo pudo brotar con la observación de los resultados de la sobrecocción de engobes que contenían arcilla, caliza y mica. Los depósitos de ceniza del horno pudieron entrar en los componentes de los esmaltes pétreos. Hacia el segundo milenio a.C., los ceramistas chinos utilizaban dos tipos de esmaltes pétreos: caliza y "piedra china". Esta última se mezcló al principio con la propia pieza cerámica, un procedimiento que culminó cerca del año 600 d.C. con la invención de la porcelana, realizada predominantemente con "piedra china". El caolín, el más común de los ingredientes actuales, se añadió más tarde.

En el siglo XI de nuestra era, los artistas de China septentrional suministraban a la corte imperial piezas pre-

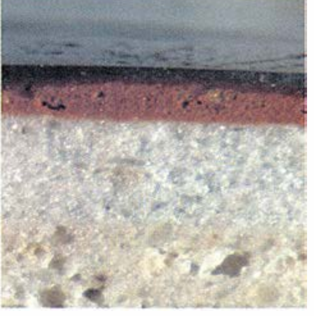










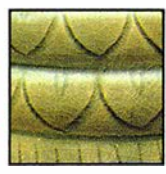


5. LA DIVERSIDAD DE ESMALTES obedece a los distintos materiales y procesos empleados. La copa de vino ática del siglo v a.C. (*1*) se decoró con un revestimiento negro sobre fondo rojo; la fotografía al microscopio electrónico, adjunta, muestra partículas de revestimiento sinterizadas por encima de una base de arcilla gruesa. La faenza egipcia (*2*) es un esmaltado vítreo sobre cerámica de cuarzo. Aquí se ofrecen un soberbio cáliz (800-900 a.C.) esmaltado por fusión de sales de cobre que afloran desde el sustrato, glóbulos reproducidos en el laboratorio de la autora por cocción de la pieza sumergida en sales de cobre, cal viva y carbón y un diseño de pedrería (1450 a.C. aproximadamente) realizado por mezcla de vidrio coloreado con pasta de cuarzo. El león (*3*), de unos sesenta centímetros de largo, pertenece al templo de Ishtar in Nuzi, Irak, data de alrededor de 1500 a.C. y es la más antigua cerámica conocida con un esmalte vítreo. Esmaltes coloreados de plomo decoran un jarrón chino del siglo viii (*4*). Esmaltes moteados sobre una taza de té de la dinastía Song (*5*) están realizados con hematites roja y cristales de magnetita amarilla. Los intensamente coloreados (*6*) de la *familia verde* adornan una primitiva bandeja del siglo xviii; la fotografía al microscopio electrónico destaca la presencia de partículas de hematites ultrafina en el esmalte rojo. El azulejo turco de Iznik (*7*) está decorado con intensos colores bajo un claro esmalte de plomo y álcalis.

ciosísimas, como las azuladas vajillas Jun y Ru, cuyo color remedaba "el azul del cielo tras la lluvia". La cerámica Jun pone de manifiesto una forma insólita de crear una textura pétrea de aspecto graso. El esmalte se conseguía tras permanecer a una temperatura de 1250 grados y someterse a posterior enfriamiento lento, desarrollando una emulsión de dos líquidos vítreos. Igual que el aceite y el vinagre, eran más estables por separado que en mezcla, lo que originaba múltiples y minúsculas gotas de unas decenas o centenares de nanómetros de diámetro. Las dos fases presentaban índices de refracción distintos y desviaban la luz al cruzar de una fase a otra; el recorrido luminoso mayor, y más indirecto, creaba la sensación de translucidez y profundidad. El mismo fenómeno puede verse en una botella de aderezo de ensalada con aceite y vinagre que agitemos con brusquedad; cada líquido por sí solo es transparente, pero la emulsión es translúcida.

En 1127, la corte Song huyó hacia el sur y estableció la dinastía Song meridional en Hangzhou. Los ceramistas iniciaron una súbita búsqueda encaminada a adaptar la tradicional cerámica típica Yue al gusto de la corte por las vajillas brillantes, similares al jade. El resultado de tal empeño fueron las célebres cerámicas Guan ("imperiales") y Longquan, de color verde celadón. Longquan era una ciudad comercial en el sudoeste de Hangzhou, donde la cerámica que se fabricaba se destinaba sobre todo a la exportación. El notable acabado de los esmaltes verde celadón reside en su textura sedosa, translúcida, con matices cambiantes entre verde mar pálido a verde gris.

El punto de partida de los artesanos del esmalte celadón fueron los esmaltes Yue, finos, homogéneos, de tipo claro y coloreados por óxido de hierro en tonos variables desde marrón hasta verde y amarillo. Los esmaltes Yue deben su fluidez a su alto contenido en calcio. Los esmaltes celadón decuplicaban su espesor; para evitar la fluidez del esmalte, se rebajó el contenido en óxido de calcio y se dejaban en suspensión partículas de cuarzo y burbujas. Además, el esmalte celadón, a diferencia del esmalte Yue, presentaba numerosas partículas cristalinas, acículas de anortita sobre todo, de algunas micras de longitud, y partículas esféricas de pseudowollastonita.

								
		IRAN 3500 a.C.	**EGIPTO 3500 a.C.**	**IRAK 1500 a.C.**	**GRECIA 500 a.C.**	**CHINA (SUR) 1000 d.C.**	**CHINA (NORTE) 1000 d.C.**	**CHINA (SUR) 1200 d.C.**
		OBJETOS PINTADOS DE SEH GABI	CUENTAS DE FAENZA AZUL DE BADARI	CLAVO DE PARED DE NUZI	LOSETA ATICA ROJO-NEGRA	JARRON YUE	COPA JUN	CELADON LONGQUAN
ESMALTE		ENGOBE PREFRITADO VITRIFICADO OPACO NEGRO	VITRIFICADO ALCALINO DE COBRE AZUL TRANSLUCIDO	VITRIFICADO OPACO AZUL DE ARCILLA ALCALINA	ENGOBE SATINADO NEGRO DE HIERRO REDUCIDO	VITRIFICADO TRANSPARENTE DE PIEDRA CHINA CALCICA	VITRIFICADO TRANSLUCIDO DE PIEDRA CHINA AZUL Y ROJA	ESMALTE DE PIEDRA CHINA VERDE-AZUL TRANSLUCIDO SATINADO
SUSTRATO		TERRACOTA DE ARCILLA CALCAREA	CUARZO	ARCILLA FERRICA	TERRACOTA DE ARCILLA FERRICA	PIEDRA CHINA	PIEDRA CHINA	PIEDRA CHINA
TEMPERATURA DE COCCION DEL ESMALTE (GRADOS CELSIUS)		900 / 1,000	800 / 1,000	900 / 1,000	850 / 1,050	1,100 / 1,200	1,200 / 1,300	1,200 / 1,250
OXIDOS (PORCENTAJE EN PESO): COMPONENTES REFRACTARIOS	SiO_2	59.00	78.97	51.46	45.63	60.40	71.70	67.00
	Al_2O_3	14.54	.51	10.10	32.52	12.80	10.40	13.60 – 16.70
FUNDENTES	Fe_2O_3	13.59	.19	4.35	13.61	1.25	1.74	1.60
	CaO	4.98	.70	8.93	.45	17.20	8.53	7.20 – 10.13
	MgO	1.17	0	4.23	2.40	2.30	1.60	.65
	Na_2O	1.60	9.25	14.37	.64	.95	1.30	.50
	K_2O	3.20	.24	3.31	4.18	1.60	3.92	5.60
	PbO	0	0	.15	0	0	0	0
IMPUREZAS Y COLORANTES	TiO_2	.49	—	.80	.51	.70	.21	.08
	P_2O_5	.10	—	—	—	1.71	.42	.04
	Cl	—	.59	—	—	0	0	0
	CuO	.20	9.46	1.37	—	—	.10	—
	MnO	.31	.06	.01	—	—	—	.55
TOTAL		99.18	99.97	99.08	99.94	98.91	99.92	96.82

Cuando analizamos la composición química a través del espesor del esmalte, descubrimos que las zonas ricas en potasio y aluminio, aunque bajas en calcio, contenían principalmente anortita, mientras que en las zonas ricas en calcio predominaba la pseudowollastonita. Estas variaciones locales de composición obedecían a la combinación de materias primas trituradas groseramente (verbigracia, calizas) con "piedra china" y ceniza; las sometían a una mezcla parcial. Puesto que en la cerámica Yue los mismos materiales se pulverizaban finamente y se mezclaban bien, el esmalte celadón no era fruto de ningún trabajo tosco, sino de una técnica cuidada.

El proceso de cocción experimentó también un cambio. En los celadones, las partículas no disueltas de cuarzo se rodean de un halo de sílice fundida, prueba de que el esmalte estuvo sometido a altas temperaturas por un tiempo prolongado, pero no hasta el extremo de que la sílice fundida recristalizara formando cristobalita (una de las fases cristalinas de la sílice). Los ensayos de reproducción del proceso nos facultan para afirmar que los esmaltes celadón se cocían a una temperatura entre 1200 y 1250 grados y luego se enfriaban durante varios días. Dicho proceso conducía a la formación de cristales de anortita y pseudowollastonita en el esmalte. Nueve siglos después de la invención de ese esmalte, los ingenieros de la empresa Corning Glass Works desarrollaron un proceso análogo en la cerámica Corelle. Se producía en forma de vidrio claro, para introducirla después en un horno controlado que permitía la precipitación y el crecimiento de los cristales. El proceso refuerza el vidrio y le confiere un color blanco opaco.

En otro famoso esmalte se induce también el crecimiento de cristales: el Jian ("mancha de aceite") o esmalte Temmoku. Contiene cerca de un 10 por ciento de óxido de hierro; si se mantiene, cierto tiempo, en un estado fundido viscoso, se forman "copos" de hematites dorada y magnetita plateada. Alcanzada la temperatura de esmaltado, el esmalte fluye; los cristales podrían así derretirse en líneas de pendiente, desarrollando una textura de "piel de liebre".

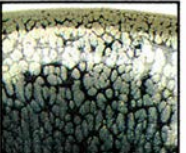
Se admite entre los expertos que los celadones, los Jun o los Jian, surgieron en virtud de la producción a gran escala de cerámica de alta temperatura en China. Las crecientes dimensiones de los hornos, necesarias para acomodarse al incremento de producción, prolongaron el tiempo, la temperatura y el período de enfriamiento; un resultado accidental sería la formación de cristales. No les pasó inadvertida a los alfareros, quienes, cuando sus clientes desearon tales texturas, resolvieron cómo controlar dichos efectos. A los ceramistas modernos, obsesionados por el rendimiento, se les hace difícil entender, e imitar, las técnicas "derrochadoras" de la dinastía Song: trituración gruesa, deficiente mezcla y cocción prolongada.

Tras el descubrimiento de los esmaltes pétreos, el siguiente gran avance técnico fue el desarrollo de esmaltes de plomo. Los arqueólogos no han aclarado todavía si aparecieron primero en la región mediterránea, en el sudoeste asiático o en China, pero están de acuerdo en que estos esmaltes existían en las tres regiones desde hace unos 2000 años, una época conocida por la consolidación de los imperios romano, persa y Han, que establecieron entre sí lazos de comunicación y comercio.

Los esmaltes de plomo se idearon a partir de un nuevo tipo de esmaltes pétreos que contenían el metal. Pueden pulverizarse, aplicarse directamente y cocerse a baja temperatura (desde 800 a 1000 grados); adquieren una amplia gama de flamantes colores y producen una superficie brillante causada por el alto índice de refracción del vidrio de plomo. Los esmaltes de plomo podían aplicarse en capas muy finas y ello explica su empleo en piezas de delicada porcelana que imitaron los objetos de plata. Pero ofrecían un inconveniente; demasiado líquidos, fluían con facilidad.

En las dinastías Song y Ming, los esmaltes de plomo suministraron la base para el sobreesmaltado: esmaltes intensamente coloreados se cuecen, se pulverizan y después se pintan o pulverizan sobre una pieza esmaltada precocida. Las cerámicas decoradas se cuecen por segunda vez, a menor temperatura, para sinterizar y unir el esmalte al vidriado. Los esmaltes se diseñan para fundir totalmente a la misma temperatura, unos 800 grados. El sobreesmaltado reviste interés particular en la decoración de la porcelana, que debe ser cocida a muy alta temperatura, lo que podría descomponer muchos colores y difundirlos a través del esmalte. Esta técnica de esmaltado ponía en mano de los artistas un amplio repertorio de texturas y colores.

En Persia, durante el siglo XII, algunos artistas desarrollaron sobreesmaltes, a partir de vidriados de plomo, para un tipo de cerámica denominada minai. Pero los artistas del Oriente Próximo prefirieron, en general, pintar diseños en colores que se aplicaban bajo el esmalte (de forma similar a la tradicional cerámica blanco-azul china). Esta técnica alcanzó su apogeo con los azulejos turcos de Iznik, elaborados en el reinado de Suleiman el Magnífico (1520-1566). Los azulejos están decorados con exuberantes diseños florales bajo un claro y brillante vidriado de plomo. Para aguzar el contraste entre los colores y el fondo, la pieza de arcilla secada se cubría primero de una capa de fina pasta blanca de cuarzo. Se tomaba un gran cuidado en la elaboración de los preparativos. Los artistas hacían fritas azules, turquesa y verde usando



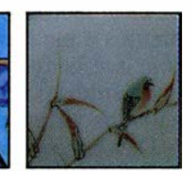
CHINA (SUR) 1200 d.C.

COPA JIAN O TEMMOKU



TURQUIA 1500 d.C.

AZULEJO DE IZNIK



CHINA (REINO KANG HSI) 1713 d.C.

BANDEJA JINGDEZHEN

ESMALTE OPACO FERRICO MOTEADO DE PIEDRA CHINA	COLORES PREFRITADOS BAJO VIDRIADO DE PLOMO TRANSPARENTE	ESMALTE ROJO CON PLOMO SOBRE PIEDRA CHINA TRANSLUCIDA
CERAMICA FERRICA	FRITA SILICEA	PORCELANA
1,200 1,100	1,100 1,000	900 700
60.11	63.10	24.90
19.33	.93	4.78
7.89	.40	23.76
5.99	1.20	2.39
1.75	.98	.11
.11	16.81	.28
2.55	1.32	.25
0	13.70	42.90
.65	.02	0
1.05	—	.10
0	—	—
—	—	—
—	—	—
99.43	98.46	99.47

6. COMPOSICIONES QUIMICAS típicas de los esmaltes sobre los objetos aquí mostrados, establecidas en el propio laboratorio de la autora.

cobalto y cobre; algunas de las fritas poseían mayores índices de refracción que el esmalte claro y, por ello, producían colores fuertes y saturados. Colores rojo, gris-verdoso y negro se obtuvieron de pigmentos estables como el óxido de hierro, minerales de cromo y cromita. Los azulejos de Iznik fueron una prueba de destreza, una culminación del talento artístico del esmaltado, que se apartaba de la faenza del Cercano Oriente.

Los científicos de hoy no suelen ver en el progreso técnico algo posible más allá del contexto de las revoluciones industriales de Occidente. Lo cierto es que los artesanos de la antigüedad inventaron y refinaron técnicas diversas y complejas —algunas de ellas en la misma línea que ciertas cerámicas actuales de alta tecnología— sin las ventajas de los modernos métodos de análisis, instrumentos o medios de comunicación. Y sólo con la ayuda de estas nuevas herramientas podemos ahora conocer aquellos virtuosismos.

Del conocimiento que vamos adquiriendo de los esmaltes antiguos se benefician por igual artistas, técnicos e historiadores. Así, al principio de los años ochenta, los técnicos chinos expertos en cerámica aplicaron las conclusiones de su investigación científica, sobre la producción de los antiguos celadones, a la fabricación de réplicas exactas de los celadones Longquan, por primera vez desde el siglo XIII. Los objetos de reciente factura podrían engañar a los expertos. Sin embargo, para los amantes del arte cerámico, una mejor comprensión de la interacción entre física, geología, cultura e historia, que siente las bases de las propiedades visuales de esas creaciones, habrá de acrecentar el aprecio por estas antiguas piezas maestras.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CERAMIC GLAZES. Tercera Edición. Cullen W. Parmelee y Cameron G. Harman. Cahners Books, 1973.

THE PHYSICS AND CHEMISTRY OF COLOR. Kurt Nassau. John Wiley & Sons, Inc., 1983.

CERAMIC MASTERPIECES: ART, STRUCTURE, TECHNOLOGY. W. David Kingery y Pamela B. Vandiver. The Free Press, 1986.

INTRODUCTION TO FINE CERAMICS: APPLICATIONS IN ENGINEERING. Dirigido por Noboru Ichinose et al. John Wiley & Sons, Inc., 1987.

MATERIALS ISSUES IN ART AND ARCHAEOLOGY. Symposium Proceedings of the Materials Research Society, vol. 123. Dirigido por E. V. Sayre et al. Materials Research Society, 1988.

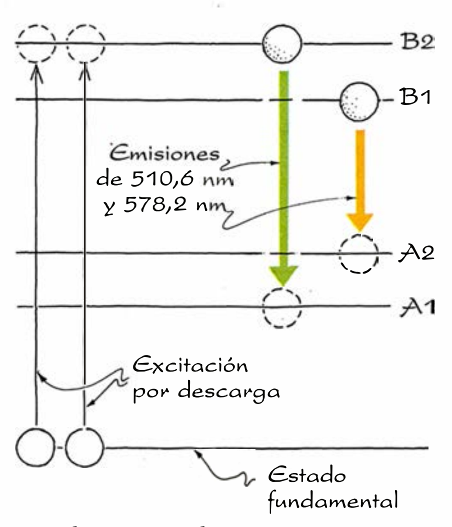
Taller y laboratorio

Un láser casero de cloruro de cobre que emite ráfagas potentes de luz verde y amarilla

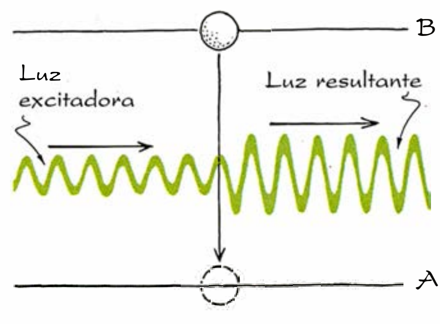
Jearl Walker

Quienes hayan intentado construir una versión casera de láser gaseoso de espectro visible saben bien que se trata de un proyecto ambicioso, de realización no poco dificultosa y cara. Hasta el láser de helio-neón, muy común, puede perfectamente quedar fuera del alcance de las posibilidades del aficionado. Baste con decir que el tubo del láser requiere un esmerado trabajo de vidriero, y el espejo dieléctrico que refleja la luz y la devuelve tubo atrás para mantener el efecto láser suele encontrarse por encima del bolsillo del aficionado medio.

Martin Gosnell, de Charmhaven, localidad australiana próxima a Sydney, me acaba de enviar planos e instrucciones que pueden permitir a los aficionados con conocimientos del tema construir un láser de cloruro de cobre sin necesidad de grandes habilidades y a un precio aceptable. El elemento generador de láser es vapor de cobre; fórmase éste cuando la primera de un par de descargas eléctricas discurre a través del láser; la segunda descarga, unos 150 microsegundos después, provoca que el vapor genere un pulso de luz verde y amarilla. Mi amigo Gosnell consigue hasta casi 50 pulsos de láser por segundo, de suerte que el haz de salida parece continuo.



1. Algunos niveles energéticos en un vapor de cobre.



2. Emisión estimulada.

Pese a las aparentes pretensiones del proyecto, no se precisa un tratamiento especial del vidrio; además, la luz generada es tan intensa que, en vez del espejo dieléctrico, puede emplearse un portaobjetos de microscopio revestido de aluminio. (Una seria advertencia sobre la manipulación: en la generación de láser intervienen descargas de alta tensión letales, motivo por el cual la construcción de este artefacto no debe acometerla nadie carente de experiencia en circuitos de alta tensión.)

Antes de entrar en los detalles del montaje, conviene que les explique de qué modo puede hacerse que un vapor de cobre emita láser. En el diagrama simplificado de la figura 1 se indican los niveles energéticos que, según la mecánica cuántica, le están permitidos ocupar al átomo de cobre. De partida, el átomo se encuentra en su “nivel fundamental”, o nivel energético más bajo. Cuando una descarga atraviesa el vapor, algún electrón integrante de la corriente chocará con ese átomo y le cederá energía suficiente para que salte a un nivel energético más alto, o sea, para que adquiera un “estado excitado”. En el diagrama se muestran dos parejas de estados excitados. (Por razones en las que no voy a entrar aquí, los niveles de cada pareja difieren levemente en sus energías; las parejas las he designado a capricho, sin referencia a sus verdaderas identificaciones espectroscópicas.)

Todo átomo excitado puede “desexcitarse” hasta un nivel más bajo mediante la emisión espontánea de un fotón que se lleve consigo la energía que el átomo pierde al saltar. Como los niveles energéticos permitidos al átomo son fijos, la energía de ese fotón está restringida a ciertos valores. La luz emitida acostumbra representarse en forma de onda y no de fotón; por eso, la longitud de onda asociada a la misma onda estará restringida a unos valores determinados. Citemos un ejemplo: si un átomo de cobre salta del nivel B2 al A1 del diagrama, emitirá luz de 510,6 nanómetros, que es verde. El salto de B1 a A2 emitirá luz de 578,2 nanómetros, que es amarilla.

Un átomo excitado puede también “desexcitarse” merced a un proceso de emisión estimulada. Supongamos que una onda luminosa de 510,6 nanómetros, la misma longitud de onda que emitiría el átomo al saltar espontáneamente al nivel A1, pase cerca de un átomo [*figura 2*]. La onda a su paso interactúa con el átomo, obligándolo a saltar cual si le diera una orden. Se dice entonces que en este proceso la luz ha estimulado la emisión, impidiendo que el átomo salte hasta cualquier otro estado, como el fundamental por ejemplo, e incluso que salte al mismo estado en un momento posterior. La onda que emite el átomo refuerza la original, porque tienen la misma longitud de onda, viajan en la misma dirección y son “coherentes”, o sea, síncronas; la luz resultante es más intensa que la original. De manera análoga, un átomo que esté inicialmente en el estado B2 puede ser estimulado para que salte al A2 por una luz de 578,2 nanómetros de longitud de onda. En cada caso, la pareja de niveles que intervienen en el salto estimulado reciben el nombre de par del láser, puesto que constituyen la base de la emisión luminosa del mismo.

De lo que se trata en un láser de vapor de cobre es de excitar los átomos a los estados B bombardeándolos con los electrones de una descarga eléctrica. Ocurrirá entonces que parte de los átomos excitados saltarán espontáneamente a los estados A, más bajos, y emitirán ondas (o fotones) a lo largo del tubo. Esa luz emitida se ve de pronto reforzada por la reacción en cadena de emisión estimulada que provoca a su paso por otros átomos excitados en el estado B. En la representación ondulatoria de la luz, diremos que la onda se hace más potente; en la representación fotónica, diremos que aumenta el número de

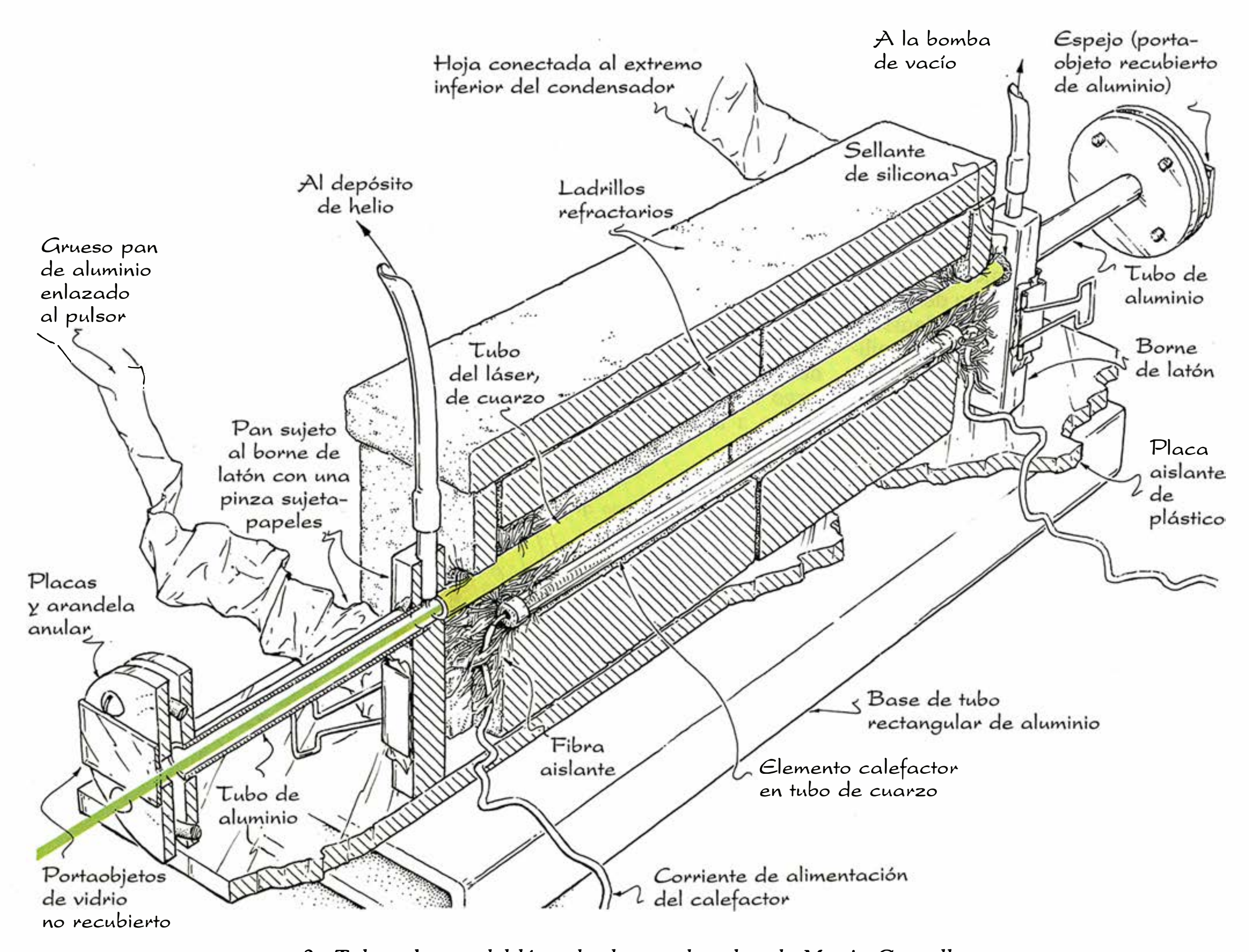
fotones. La luz que llega al extremo del tubo donde se halla el espejo, se refleja en éste y retrocede por entre los átomos provocando otra tanda de saltos estimulados. La luz que llega al extremo opuesto del tubo, donde no hay espejo, sale al exterior y es lo que constituye el láser.

Cuando los láseres gaseosos hicieron su aparición a comienzos de los años sesenta, los de vapor de cobre ofrecían grandes esperanzas, pues prometían un rendimiento mayor que otros. Confianza que se basaba en lo que aquí he llamado niveles B, que no están muy por encima del estado fundamental: no cabía esperar que se precisara mucha energía para que los átomos saltaran a ellos. Pero la investigación no tardó en revelar una grave dificultad, y es que había que calentar el vapor de cobre hasta unos 1500 grados Celsius para que emitiera láser.

En 1973 los investigadores descubrieron que sustituyendo el cobre puro empleado en los primeros diseños por un haluro del metal, como es el cloruro de cobre, y enviando a través del tubo una serie de descargas de doble pulso, la temperatura necesaria se quedaba en unos 400 grados C, más asequibles. El éxito era debido al papel de las dos descargas. La primera de éstas disocia las moléculas a la vez que excita e ioniza algunos de los átomos liberados. Si la segunda descarga se demora lo suficiente para que los átomos de cobre vuelvan a caer al estado fundamental, aunque sin esperar a que puedan recombinarse con el cloro, excitará los átomos hasta los estados B, igual que acontecía en el diseño original en que la fuente de vapor era cobre puro. Esta técnica de la descarga doble era una idea magnífica, pero requería unos costosos conmutadores, un generador de señales de doble pulso y otros dispositivos electrónicos muy caros. Gosnell ha logrado construir un láser de cloruro de cobre con piezas baratas y más corrientes.

La parte esencial del láser de Gosnell es un tubo de cuarzo que atraviesa un horno construido de ladrillos refractarios de alúmina y silicio [*figura 3*]. Este tubo, de 55 centímetros de longitud y un centímetro de diámetro interior, se prolonga hasta penetrar en sendos bornes de latón que hay a cada lado del horno. Estos bornes, situados a unos cuatro centímetros del horno, tienen una sección cuadrada de 25 milímetros de lado y una altura de 12 cm. El tubo se sella a los orificios de los bornes con silicona.

Por la cara opuesta de cada soporte, se alarga el láser con 13 centímetros de tubo de aluminio, cuya función es enfriar y condensar los vapores internos e impedir que lleguen a los elementos ópticos instalados en los extremos opuestos de esos tubos de aluminio. En uno de los extremos del láser un portaobjetos de microscopio recubierto de aluminio sirve de espejo. (Este se monta con la cara reflectora hacia el exterior.) En el otro extremo, un portaobjetos de vidrio no recubierto permite la salida al exterior del haz láser. (Si en cualquiera de esos portaobjetos se condensaran los vapores, desaparecería el efecto láser.) Para montar los portaobjetos de modo que luego pudieran ajustarse, Gosnell ideó una construcción por placas separadas por una arandela anular y sujetas una a otra por tres tornillos. Abrió entonces un orificio



3. Tubo y horno del láser de cloruro de cobre de Martin Gosnell.

pasante y selló el conjunto al extremo del tubo de aluminio, fijando el portaobjetos al exterior del orificio.

Cuando se activa el láser, la descarga tubo abajo tiene lugar entre los dos bornes de latón, que están eléctricamente conectados a la fuente de alimentación eléctrica. La corriente llega a los bornes a través de sendas tiras de pan de aluminio sujetas a ellos mediante grandes pinzas elásticas, de tipo oficina. Los bornes llevan unos taladros verticales que sirven de lumbreras para conectar uno de los extremos del tubo a una bomba de vacío y, el otro, a un depósito de helio. Esa bomba cumple la misión de extraer aire del tubo e introducir helio en el mismo. El helio desempeña una doble función. En el tramo de tubo comprendido entre el horno y un borne, donde puede que el vapor no abunde, el gas coopera a la conducción de la descarga eléctrica. Además, favorece la condensación de los vapores en las zonas exteriores del tubo, colisionando con los átomos del vapor y despojándolos así de su energía.

Gosnell justifica su preferencia por los ladrillos de alúmina y sílice en su fácil corte, aunque sugiere que podrían probarse otros materiales para altas temperaturas. La característica esencial buscada con el recinto es que, cuando se calienta el horno, la temperatura en la porción de tubo que encierra sea lo más uniforme posible. Gosnell calienta el horno con un elemento calefactor común, que puede comprarse en cualquier tienda donde se vendan recambios para electrodomésticos. El elemento calefactor se introduce en un tubo de cuarzo que atraviesa el horno paralelamente al tubo generador y a unos 25 milímetros de éste. (Con una separación menor cabría el peligro de la formación de un arco voltaico entre ambos tubos.) Para hermetizar los orificios por donde penetran los tubos en el horno se emplea fibra aislante.

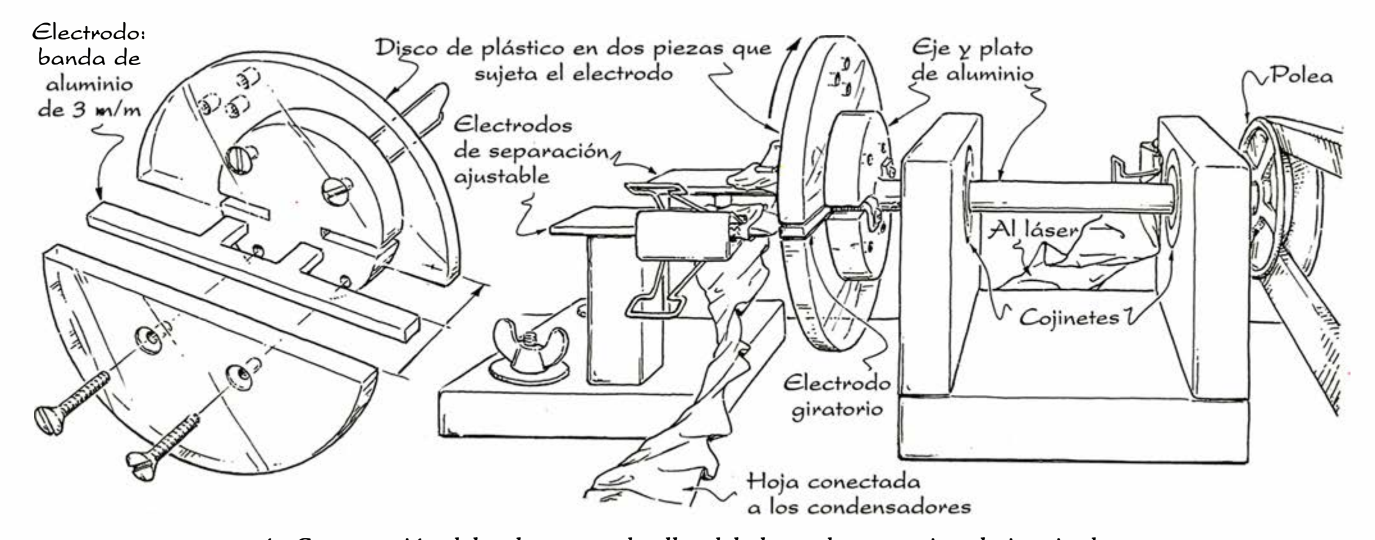
El helio penetra en el interior del tubo impulsado por una bomba de vacío monoetapa ordinaria, pero podría bastar con unos compresores de frigorífico montados en serie. Una válvula intercalada en la manguera que conecta el láser y la bomba permite cerrar el paso de la bomba. Además, para controlar la presión del helio, que se mantiene en unos dos torr, se emplea un manómetro de mercurio.

Recuérdese que hemos dicho que el efecto láser se produce merced a un par de descargas que se suceden en un tiempo brevísimo en el seno del vapor. En vez de comprar unos costosos conmutadores y un generador de pulsos, Gosnell construyó un dispositivo mecánico de conmutación que él llama pulsor [*figura 4*]. En uno de sus lados hay dos barras que sirven de electrodos, separadas apenas por un pequeño intersticio de un disco de plástico que lleva incrustada una banda de aluminio. Ese disco está montado sobre un eje de aluminio, que se hace girar a unas 6000 revoluciones por minuto mediante una correa y un motor eléctrico situados al otro lado del dispositivo. Cada una de las barras electrodos se halla conectada a un condensador cargado, que a su vez está conectado a uno de los bornes de latón que soportan el tubo del láser. La banda de aluminio, así como el eje y su soporte, se encuentran eléctricamente conectados al otro borne de latón.

Cuando el disco gira y la banda de aluminio se acerca a la punta de una de las barras, el condensador conectado a esa barra se descarga a través del intersticio; pasa la descarga a lo largo del tubo. Cuando la banda se acerca a la otra barra, que está conectada al otro condensador, se produce una nueva descarga. El tiempo que transcurre entre ambas descargas se fija mediante la posición relativa de las barras y la velocidad de rotación del disco. Ese lapso debe ser de unos 150 microsegundos, aunque el valor óptimo dependerá de la temperatura del vapor de cobre y los parámetros relacionados con ella.

Gosnell aconseja que la banda esté enrasada con la cara del disco para eliminar la posibilidad de que tropiece en la punta de alguna barra durante la rotación. Advierte que la correa que conecta el motor eléctrico con el eje no debe ser conductora, como ocurre con muchas de las correas al uso. (Con ello se consigue eliminar la electricidad estática, pero en nuestro caso cortocircuitarían al pulsor.) La separación entre las puntas de las barras y el disco suele ser de dos o tres milímetros, pero la distancia óptima sólo puede determinarse experimentalmente.

En la figura 5 se representa el circuito de la fuente de alimentación. A la izquierda, enchufados directamente a una toma de corriente doméstica, hay dos transformadores para letreros luminosos de neón iguales, de 15 kilovolt c.a. y 60 miliampère nominales. (Puede que un solo transformador suministre corriente suficiente.) La corriente que sale de los transformadores es rectificada por un grupo de diodos de alta tensión que alimentan dos condensadores de acumulación, C1 y C2. Opcionalmente, pueden colocarse en medio dos condensadores que alisen la corriente de alimentación y que permitan extraer corriente independientemente de la fase de la corriente alterna. Afirma Gosnell que el láser funciona bastante bien sin esos condensadores adicionales.



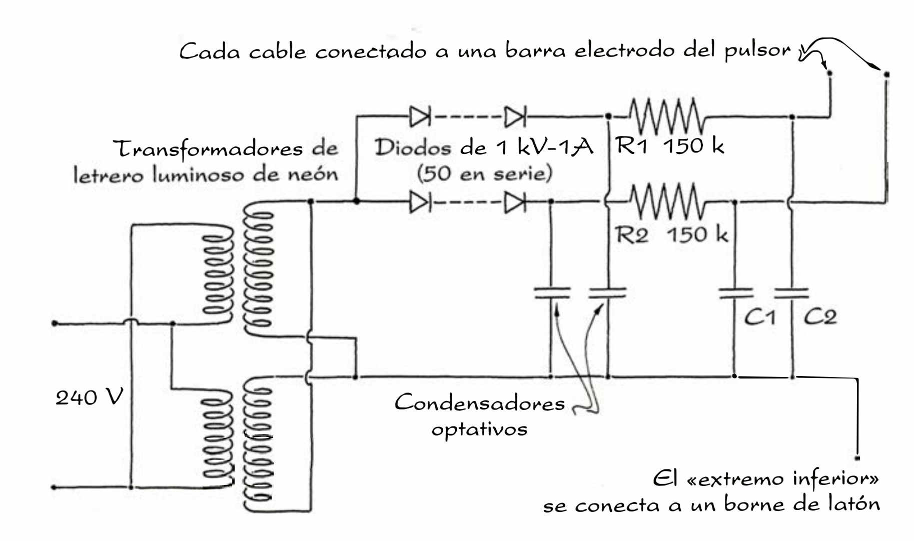
4. Construcción del pulsor, con detalles del electrodo rotatorio a la izquierda.

Las resistencias representadas por R1 y R2 en la ilustración son dos resistencias de 1500 ohm, de dos watt nominales, conectadas en serie-paralelo. Los condensadores C1 y C2 están hechos de capas alternas de pan de aluminio y láminas de plástico y tienen una superficie útil de unos 1500 centímetros cuadrados. Para conseguir una capacidad del orden de 15 nanofarad, Gosnell empleó plástico poliéster o polietileno.

En la instalación de Gosnell los condensadores están colocados en un soporte situado encima mismo del láser al objeto de minimizar los problemas eléctricos que aparecerían con una distancia mayor. (Los condensadores adicionales los construyó también de hojas de aluminio y plástico, pero luego los enrolló e introdujo en un tubo de CPV, de un metro de largo y 10 centímetros de diámetro, que instaló debajo del láser.) El pulsor descansa sobre un trozo de plástico grueso, rígido y aislante, colocado sobre los condensadores. Las tiras de pan de aluminio que conectan los condensadores, el pulsor y los soportes del láser son todas de unos cinco centímetros de ancho. La inductancia de los condensadores y del circuito entre éstos y el tubo de láser debe ser baja, para que la corriente de descarga aumente con rapidez, disociando las moléculas de cloruro de cobre y excitando los átomos bruscamente.

En prevención de una rotura accidental de los componentes giratorios del pulsor, Gosnell montó delante de éste una pantalla protectora de plástico grueso. Para reducir el peligro de sacudidas eléctricas, cruzó cada condensador con resistencias "de drenaje" de alta tensión que disiparan la carga al apagar el sistema. (Aquí he de volver a avisar del peligro implícito en las corrientes letales que atraviesan la fuente de alimentación y el láser, capaces de producir una desgracia si se toca algún condensador cargado, incluso después de apagar el sistema.)

La corriente del elemento calefactor está controlada por un transformador variable variac. Para disponer de un control alternativo, Gosnell conectó un segundo elemento calefactor en el exterior del horno al que se encontraba dentro y luego unió uno de los cables de la fuente eléctrica al segundo elemento con una pinza de cocodrilo. Variando la posición del cable a lo largo del segundo elemento calefactor, se puede controlar qué porción de éste forma parte del circuito, modificando así la resistencia del circuito y, por tanto, el calor en el interior del horno. Con uno u otro procedimiento de control, acostumbra calentar el horno hasta los 390 °C, lectura obtenida con un termopar instalado en el interior.



5. Diagrama del circuito de la fuente de alimentación.

Para centrar el espejo del tubo de láser de modo que reflejara la luz directamente hacia atrás por dentro del tubo, Gosnell miraba por el extremo opuesto desde una distancia aproximada de un metro, mientras un ayudante apretaba los tornillos de ajuste de la montura del espejo. Cuando vio su ojo reflejado en el centro del espejo, consideró que el centrado estaba correcto. (Ni que decir tiene que nunca hay que mirar al láser cuando está conectado. Sus descargas pueden causar daños muy graves a la retina.)

Para comprobar que no había fugas de aire en el tubo, Gosnell desconectó el circuito eléctrico y luego conectó un transformador de letrero luminoso de neón entre los bornes de latón. Con la bomba vació y rellenó de helio varias veces el tubo; tras lo cual, lo llenó de helio a una presión de unos 10 torr y enchufó el transformador. Cuando el sistema carecía de fugas, la descarga en el tubo adquiría un color gris blanquecino; en caso contrario, era rosa.

Preparó el cloruro de cobre calentando, en una campana química, el contenido de un cuarto de cucharilla de café (un mililitro, más o menos) de los cristales del compuesto hasta que dieron un líquido marrón verdoso. (Es necesario usar la campana porque la aspiración de los vapores resulta nociva.) Después de que el material se hubiera enfriado y solidificado, lo machacó hasta dejarlo convertido en un polvo fino que cerró herméticamente en un receptáculo desecante. Tanto el calentamiento como la desecación tienen por objeto eliminar el agua y el sobrante de cloro.

Cuando ya estuvo preparado para poner en marcha el láser, colocó el polvo en el centro del tubo, introduciéndolo por uno de los extremos valiéndose de una especie de cuchara larga y fina que se construyó él mismo. (Señala aquí que esa operación hubiera sido más fácil de haber provisto al tubo de un apéndice vertical por el que verter el polvo. Tal apéndice sobresaldría del horno y podría cerrarse con un tapón de caucho.)

Para estabilizar la temperatura, antes de poner en funcionamiento el láser, el horno se mantenía caliente durante una hora más o menos. A lo largo de ese tiempo, Gosnell vaciaba y rellenaba el sistema con helio varias veces. Tras una comprobación final de la presión y la separación entre las barras electrodos y el disco de plástico del pulsor, ponía en marcha el motor que movía al pulsor. En sus primeras tentativas, las ráfagas de luz láser no fueron continuas; pero, experimentando con la presión del gas, la temperatura del horno y las posiciones de las barras electrodos, acabó por lograr que en una tarjeta intercalada en el camino del haz se produjera una iluminación más estable de un verde y amarillo intensos.

Gosnell, ejemplo de modestia, sugiere que cualquier especialista en la construcción de láseres caseros puede perfectamente mejorar su artefacto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A PARAMETRIC STUDY OF THE COPPER CHLORIDE LASER. Noble M. Nerheim en *Journal of Applied Physics*, vol. 48, n.° 3, págs. 1186-1190; marzo de 1977.

RESONANCE RADIATION TRAPPING EFFECTS IN COPPER AND MANGANESE LASERS. K. Srigouri, S. Ramaprabhu y T. A. Prasada Rao en *Journal of Applied Physics*, vol. 61, n.° 3, págs. 859-863; 1 de febrero de 1987.

Juegos matemáticos

¿Cuántas cabras hay en el huerto?

Ian Stewart

¡Cuerno de cuerno de cabra...!

Quinn, el granjero, no estaba para bromas.

"¡Barney, has vuelto a dejar entrar las cabras en el huerto!

—Sí, Al. Ya es hora de que ramoneen y aprovechen también la hierba."

Quinn alzó al cielo la mirada y dejó escapar un suspiro.

"¡Pero no antes de haber recogido las manzanas, Barney!, recalcó. Este año vienen un poco retrasadas por culpa de la sequía."

El verano había sido seco en el Weffolk.

"¡Sabes perfectamente que se encaraman a los árboles! Las muy pillas sacuden las ramas con los cuernos y hacen caer las manzanas, y después, ¡hala, a atiborrarse! ¡Echalas de ahí enseguida!".

Quinn arrojó el sombrero al suelo y lo pateó furiosamente. Después recorrió el huerto, contando cuántos árboles habían perdido las manzanas: 314, ni uno menos. Quinn se apoyó entonces en la barra superior de la puerta, mordisqueando una pajita, perdido en sus pensamientos. Finalmente, tomó una decisión.

"Bueno, será mejor salvar lo que se pueda. Barney, cerca con tela metálica los manzanos que han perdido el fruto, y mete a pacer allí las cabras. ¡Y ten cuidado de que los animales no puedan llegar a los otros árboles!".

Barney se apresuró a obedecer. Los únicos ruidos que amenizaron la siesta fueron los martillos, al clavar a los árboles la tela metálica, y los balidos de protesta de las cabras espantadas.

Barney reapareció a media tarde, todo sucio y sudoroso.

"Ya he terminado, Al. ¡Qué cosa más cansada! ¡He clavado esa condenada tela metálica a 199 árboles! Voy a dejar entrar las cabras.

—Bueno, pero hará falta saber si podrás alimentarlas a todas.

—¿Cómo dices?

—Mira, Barney, es muy sencillo. Los manzanos están plantados en los nudos de una malla cuadrada, ¿no es verdad?

—Sí, Al.

—Bueno. Ahora bien, cada cabra ha de pacer diariamente la cantidad de hierba que hay en uno de los cuadrados de esa parrilla; esa es su ración cotidiana. ¿Te das cuenta? Un cuadrado, una cabra.

—Humm... ¡Sí!

—Pues ya está. No tienes más que contar el número de cuadrados que abarca tu cierre y ya tienes el número de cabras que puedes apriscar en él.

—Ah...sí. Esto... Oye, Al...

—Sí, Barney, ¿qué pasa ahora?, dijo Algernon Quinn con tono de fastidio.

—Al, es que no sólo hay cuadrados. He tenido que instalar al bies muchas partes del cierre.

—Pues averigua entonces la superficie total tomando como unidad el área de un cuadrado.

—Es demasiado difícil. El cierre tiene una forma muy rara [*véase la figura 1*].

Al final, Algernon se decidió a echar una ojeada. Tras no pocos pisotones a su sombrero e imprecaciones en abundancia, Al y Barney decidieron solicitar consejo a Jacob Staff, un agrimensor de una ciudad cercana.

"He aquí lo que llamo un problema interesante, dijo Jacob. Puedo realizar un plano del campo y deducir la superficie por triangulación...

—¡Bien!

—...si ustedes aceptan abonar las tarifas reglamentarias.

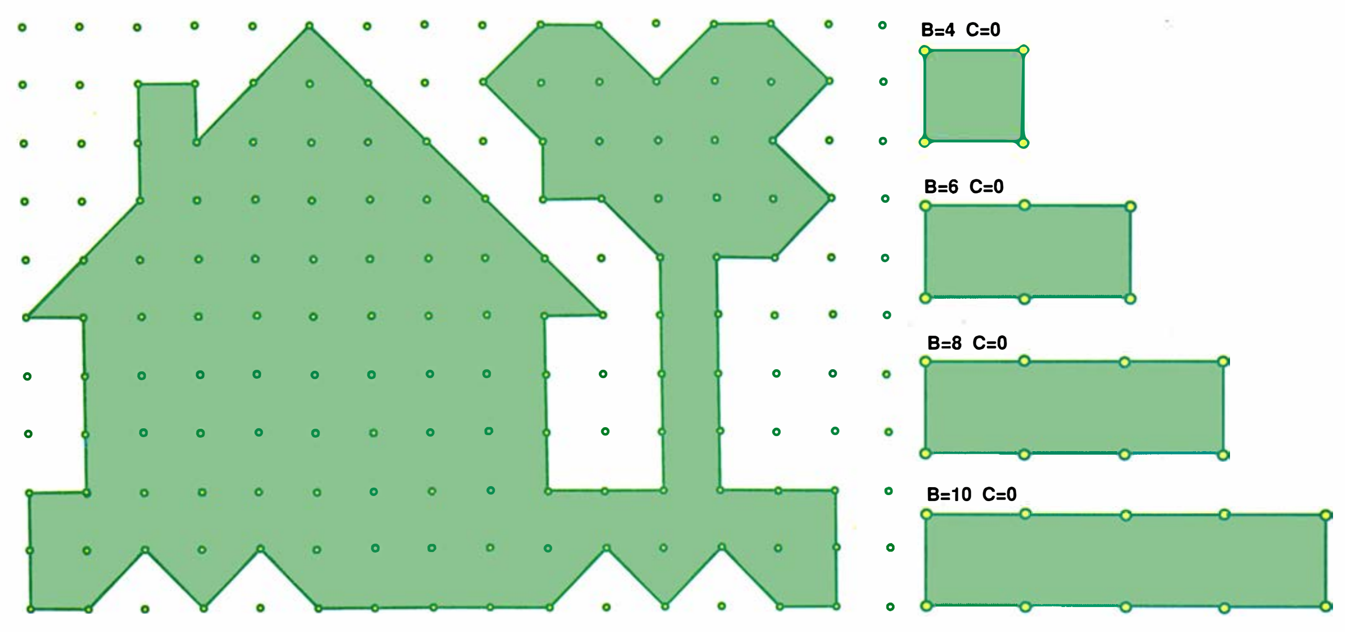
—¿Tarifas? ¿Qué tarifas?

—20.000 pesetas por el plano y otras 20.000 por la triangulación.

—¡40.000 pesetas! ¡El abuelo Heriberto se alzaría en su tumba! Si no lo hace es porque aún no ha muerto.

—Bueno, existe un procedimiento más económico. Se trata de un viejo

1. ¿Cuántas cabras pueden alimentarse en el recinto cercado del huerto? (Cada cabra pasta la cantidad de hierba crecida en uno de los cuadrados de la malla.)



2. *Los vértices de un polígono reticular han de encontrarse sobre los nodos de una red cuadrada.*

3. *Rectángulos 1* × l *correspondientes* l = *1,2,3,4.*

truco de agrimensor. Veamos, por lo que sé, han plantado ustedes los árboles del huerto según lo que los matemáticos llaman un retículo."

Barney echó mano de una estaca.

Jacob se explicó sin pérdida de tiempo. "Algernon, un retículo es un cuadriculado, una red de malla cuadrada.

—¿Y por qué no ha empezado por ahí?

—Creo que lo he dicho ya, pero no importa. Y después, ustedes han sujetado el cierre de árbol en árbol, con lo que han formado un polígono de vértices en el retículo [*véase la figura 2*]. Me acaban de decir ustedes que hay 314 árboles en el interior de este polígono o sobre él. De entre ellos, hay exactamente 199 situados sobre el polígono, puesto que Barney ha clavado la cerca a este número de árboles. Quedan 115 árboles dentro del perímetro cercado.

—Bueno, pero lo que me pregunto es de qué nos sirve todo eso.

—Existe una notable fórmula, llamada teorema de Pick, descubierta en 1899 por G. Pick, que permite calcular la superficie de un polígono cuyos vértices yacen en los nodos de un retículo cuadriculado. Todo cuanto hay que saber es el número de puntos del retículo —los árboles— situados en el interior y el número de puntos yacentes en el contorno. Es muy fácil de utilizar... y la tarifa sólo es de 1000 pesetas.

—¡Sólo 1000 pesetas! ¡Aún es bastante!."

Se produjo una larga pausa.

"Bueno, vamos a ello".

—Hay un problema, dijo Jacob. Se me ha olvidado la fórmula.

—Agrimensor... He aquí un bonito ejemplo de inútil.

—¡No sea tan categórico, Algernon! Saber que la fórmula existe puede sernos de gran ayuda.

—Y saber que la figura tiene una superficie... ¿No nos sirve eso de nada?

—No sea zumbón. Es totalmente distinto. Si sabemos que la fórmula existe, podemos recuperarla. Mientras que la evaluación directa nos conduce a la técnica tarifada en 40.000 pesetas.

—Manos a la obra, Jake. Pero te lo advierto, a nosotros los granjeros no nos entusiasma el álgebra ni la geometría. Los corderos, eso sí. De ovejas y corderos sabemos todo lo que hay que saber.

—Algernon, para lo que nos traemos entre manos, me parece que el álgebra nos llevará más lejos que los corderos.

—¿Por ejemplo?

—Trataremos de recuperar la fórmula examinando casos particulares. Llamemos A al área del polígono, B al número de puntos ubicados sobre su contorno y C al número de puntos interiores. Examinemos primero casos muy sencillos. Por ejemplo, para un cuadrado de 1×1 se tiene: $A = 1$, $B = 4$, $C = 0$. De igual manera, para un rectángulo de 1×2 tenemos: $A = 2$, $B = 6$ y $C = 0$. Y así sucesivamente [*véase la figura 3*]. Podemos construir una pequeña tabla.

—¡De acuerdo! ¡Voy a buscar las herramientas!

—No, no. Una tabla como ésta.

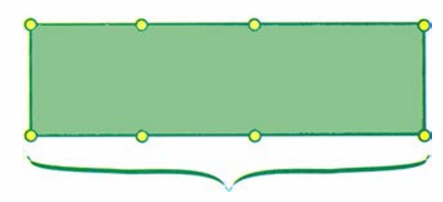
TALLA	*A*	*B*	*C*
1 × 1	1	4	0
1 × 2	2	6	0
1 × 3	3	8	0
1 × 4	4	10	0

—¡Oh!

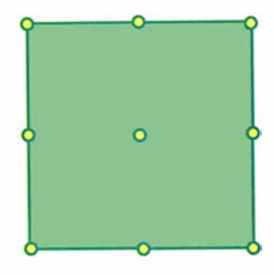
—Veamos. ¿No observáis en estos números nada de especial?

—Claro que sí. Que la columna C no vale un pepino.

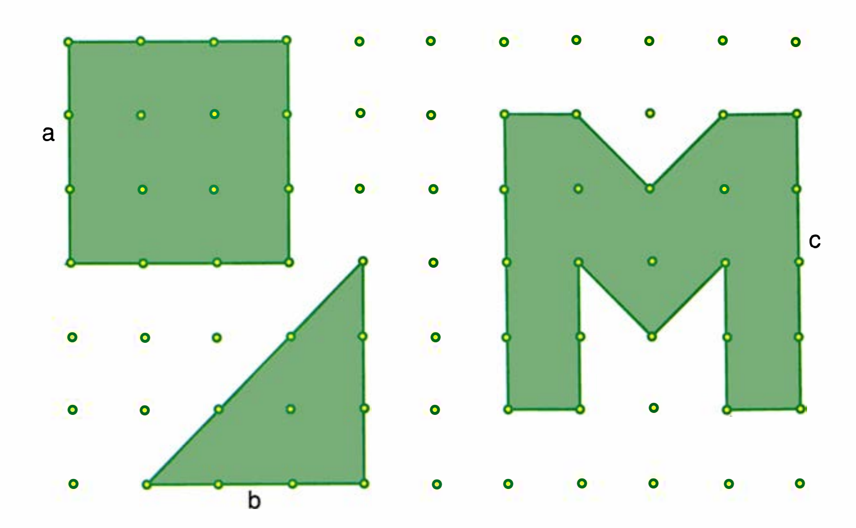
—Es cierto que C es nula hasta ahora, pero no es exactamente esa la cla-



4. *Rectángulo general de 1* × l.



5. *Cuadrado de 2 × 2.*



6. Algunos polígonos reticulares a estudiar.

se de relación que tengo en la mente. Y, por otra parte, ese hecho me molesta un poco, porque prueba que no he tomado polígonos suficientemente generales. No obstante, veo aparecer una especie de ley. El valor de B es alrededor de $2A$. De hecho, en todos los casos, la fórmula es: $B = 2A + 2$, y despejando el área, $A = B/2 - 1$. El área es en este caso la mitad del número de puntos frontera, rebajada en una unidad.

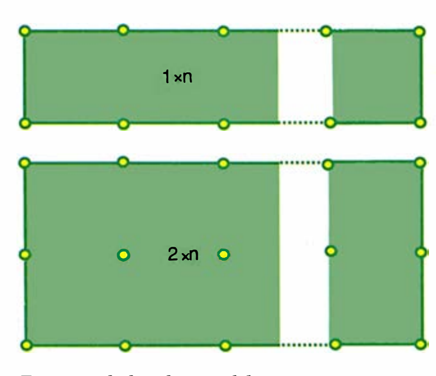
—Comprendido.

—En realidad, podemos demostrar que así es para un rectángulo $1 \times l$ de longitud cualquiera [*véase la figura 4*]. Su superficie es l, ya que cada cuadrado elemental del retículo tiene superficie unidad. Hay $l + 1$ puntos frontera superiores y $l + 1$ puntos frontera inferiores, lo que da un total de $2l + 2$ puntos.

—¡Oh, ah! Los granjeros también sabemos de doseles.

—¡Algernon, dos multiplicado por l, no doseles! ¡En este caso, l es un símbolo para denotar un número cualquiera!

—¡Oh!



7. Añadido de un bloque a un extremo de un rectángulo.

—No, "*O*" no. ¡"*Ele*"!

—¡Ah...!

Este diálogo de besugos hubiera podido durar mucho rato.

"Así pues, $A = l$, $B = 2l + 2$, y $C = 0$, y la fórmula funciona, concluyó Jake con aire triunfal.

—¡Oh, ah! ¡Caray!

—Verifiquémosla con un cuadrado de 2×2 [*véase la figura 5*]. En este caso $A = 4$, $B = 8$ y $C = 1$; ahora tenemos $B/2 - 1 = 4 - 1 = 3$. ¡Condenación! ¡La fórmula es falsa!

—Ah, pero ahora el número de puntos interiores no es nulo.

—Bien observado. Lo que dice es exacto, Algernon. Hmmm... ensayemos con algunos rectángulos $2 \times l$ y comparemos A con $B/2 - 1$...

TALLA	A	B	C	$B/2-1$	$A-(B/2-1)$
2 × 1	2	6	0	2	0
2 × 2	4	8	1	3	1
2 × 3	6	10	2	4	2
2 × 4	8	12	3	5	3
2 × 5	10	14	4	6	4
2 × 6	12	16	5	7	5

—¡Ajá! ¡Ahora veo una ley!

—¡Cualquier imbécil puede observar ahora una ley! ¡Vamos, hombre, está más clara que el vinillo blanco del país!

—Por lo menos, Algernon. La última columna es la misma que la de C, lo que hace pensar que $A - (B/2 - 1) = C$, igualdad que transformada nos da el:

Teorema de Pick

El área de un polígono reticular cualquiera es función del número de puntos frontera B y de puntos interiores C, y está dada por la fórmula:

$$A = B/2 + C - 1.$$

¿No es un resultado magnífico?

—Desde luego, Jake. Es magnífico... como 39.000 pesetas.

—Hummpff. Pero todavía no la hemos demostrado.

—¿Eh? ¿Y qué es lo que acabamos de hacer, entonces?

—Curiosidad y conjetura, Algernon, nada más. A la vista de los resultados, la etapa siguiente consistirá en ensayar otros ejemplos. Así, un cuadrado de 3×3 [*véase la figura 6a*] nos da $A = 9$, $B = 12$ y $C = 4$, de donde $B/2 + C - 1 = 6 + 4 - 1 = 9$, que es efectivamente igual a A. Pero la fórmula no es aplicable más que a rectángulos, que son casos demasiado sencillos. Veamos un triángulo [*figura 6b*] que sea mitad de un cuadrado de 3×3. El área es entonces de 4,5, puesto que es la mitad de 9, y $B = 9$ y $C = 1$. Por consiguiente, $B/2 + C - 1 = 4{,}5 + 1 - 1 = 4{,}5$, y la fórmula sigue siendo válida. Desde luego, eso es muy estimulante. Examinemos ahora el polígono en forma de M [*figura 6c*]: $B = 20$ y $C = 3$, de donde se sigue $B/2 + C - 1 = 10 + 3 - 1 = 12$."

¿Puede el lector comprobar si el valor de A es realmente 12?

"Volvamos a mi huerto. El número de árboles que hay en el cierre es...

—No tan rápido, Algernon. Seguimos teniendo que demostrar que el teorema es verdadero.

—¡Pero si ya hemos tenido muchísimas pruebas!

—También habíamos creído tener un montón de pruebas de que $A = B/2 - 1$, y sin embargo era inexacta. ¿Cómo saber, pues, que no nos hemos vuelto a equivocar? Tenemos que preparar una demostración. Volvamos al caso de $1 \times l$. Supongamos que se añade un solo cuadrado a un extremo [*véase la figura 7a*]. Entonces:

A aumenta en 1,
B aumenta en 2,
C no cambia (cero).

Y por consiguiente:

$B/2 + C - 1$ aumenta en una unidad.

Y eso es lo que le sucede a A. En el caso de $2 \times l$ [*figura 7b*], añadimos un bloque de 2×1, con lo cual:

A aumenta en 2,
B aumenta en 2,
C aumenta en 1 y
$B/2 + C - 1$ aumenta en 2, que es precisamente lo que le ocurre a A. ¡Eureka! Esto me da una idea: *al reunir dos polígonos reticulares, hay que sumar los valores de $B/2 + C - 1$*. He-

mos dado el detalle del razonamiento en el recuadro número 1.

—¡Bien mensurado!

Como podemos ver, este argumento nos asegura que, si el teorema de Pick se verifica para dos polígonos reticulares Q y R, se verificará también para su unión, P.

—¿Por qué?

—Porque sus áreas se suman de igual manera que sus valores de Pick.

—Exacto. ¡Jefe, un punto a su favor! Ya comprendo.

—Y sobre todo, este resultado nos facilita una excelente estrategia de demostración. Podremos demostrar el teorema para polígonos reticulares en cuanto sea descomponible en unión de polígonos elementales para los cuales se verifique el teorema. Así pues, ¿qué clase de polígonos elementales seleccionar?

—¿Cuadrados, tal vez?

—No, porque queremos obtener polígonos lo más generales posible, polígonos que tengan lados oblicuos.

—¡Ah, triángulos entonces!

—¡Acertaste! Y ello por una excelente razón: todo polígono, reticular o no, es descomponible en triángulos [*figura 9a*].

—Ya veo.

—Además, todo triángulo puede obtenerse por reunión o eliminación de triángulos rectángulos y de rectángulos. Tomemos, por ejemplo, el caso del triángulo U de la figura 9*b*. Sea T el triángulo grande y sean U, V, W, X los diversos polígonos. Entonces:

$\text{Pick}(T) = \text{Pick}(U) + \text{Pick}(V) + \text{Pick}(W) + \text{Pick}(X)$,

y también

$\text{Area}(T) = \text{Area}(U) + \text{Area}(V) + \text{Area}(W) + \text{Area}(X)$.

Ahora, si supiéramos que Pick da el área exacta para todo triángulo rectángulo y para todo rectángulo (y por consiguiente, para T, V, W y X), las dos igualdades anteriores demostrarían que la fórmula de Pick resulta también cierta para el triángulo U.

Unicamente tenemos que observar que los triángulos rectángulos son mitades de rectángulos [*figura 9c*]. En este caso, lo mismo que antes, los valores de Pick y las áreas se comportan idénticamente: cada uno de ellos da para el triángulo la mitad que para el rectángulo; si el teorema de Pick se verifica para los rectángulos, se verifica también para los triángulos rectángulos. A su vez, los rectángulos están constituidos por cuadrados unitarios [*véase la figura 9d*] A fin de cuentas, todo se reduce a verificar el teorema de Pick para un cuadrado unidad [*figura 9e*]... cosa hecha ya desde nuestra primera tabla."

*Si no lo encuentra convincente, no deje de experimentar [*figura 10*]. Halle las superficies de las figuras sin aplicar el teorema de Pick; aplique después el teorema y verifique su validez. Y ya que está manos a la obra, ¿será posible generalizar el teorema de Pick para poliedros cuyos vértices pertenezcan a un reticulado tridimensional?*

"Y ahora, Algernon, ya puedes decidir cuántas cabras has de apriscar en tu huerto.

—¡Ah, desde luego, desde luego! Bueno, vamos a ver, tenemos B = 199 y C = 115. El área ha de valer $A = B/2 + C - 1 = 99{,}5 + 115 - 1 = 213{,}5$."

Algernon Quinn se volvió hacia su operario.

Recuadro 1: 1/2*B* + *C* − 1 es aditiva

Tomemos dos polígonos reticulares Q y R, unidos como en la figura 8; sea P la unión de ambos. Supongamos que su frontera común tenga K puntos en el interior de la unión (*puntos azules*) más otros dos en los extremos (*puntos rojos*). Para el polígono reticular P definimos:

$$\text{Pick}(P) = 1/2B_P + C_P - 1$$

siendo B_p el número de puntos frontera de P y C_p el número de puntos interiores; hagamos otro tanto para Pick (Q) y Pick (R). Afirmamos que la expresión "Pick" es aditiva, es decir, que si P es unión de Q y R (polígonos reticulares sin porciones de superficie común) entonces se verifica Pick (P) = Pick (Q) + Pick (R). En efecto, vemos en la figura 8 que:

$$B_P = B_Q + B_R - 2K - 2$$

pues los K puntos azules situados sobre la frontera común de Q y R están en el interior de P, lo que da $2K$ puntos a restar, y los dos puntos rojos que son frontera para P, Q y R han sido contados como cuatro en $B_Q + B_R$, por lo que también hay que restar 2. De igual manera:

$$C_P = C_Q + C_R + K$$

porque los puntos interiores de P son los correspondientes a Q y a R, más los K puntos azules. Por consiguiente:

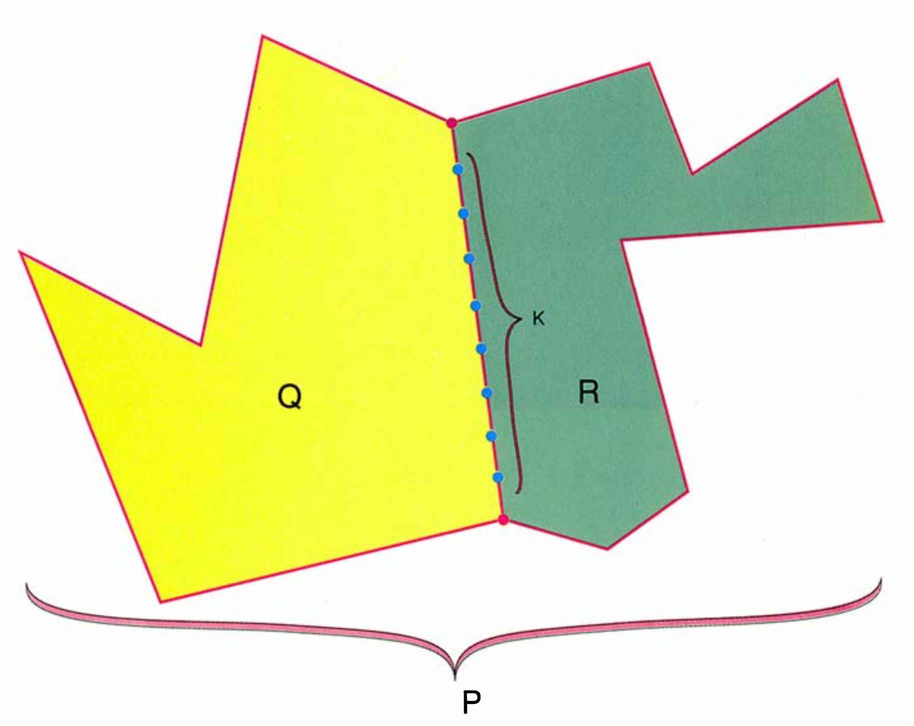
$$\text{Pick}(P) = 1/2\,(B_Q + B_R - 2K - 2) + (C_Q + C_R + K) - 1$$

lo que es igual a:

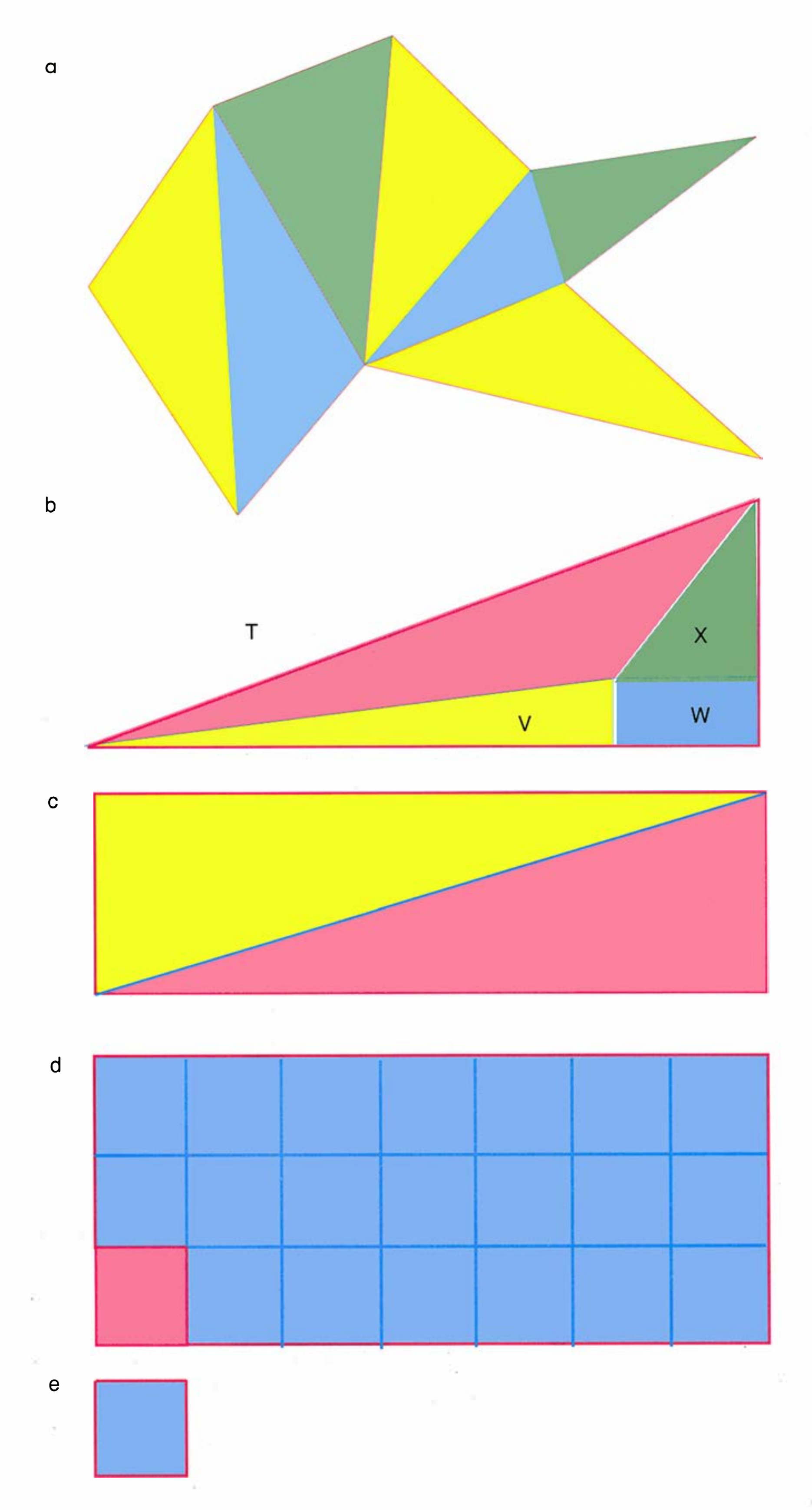
$$1/2\,B_Q + C_Q - 1 + 1/2\,B_R + C_R - 1$$

es decir,

$$\text{Pick}(Q) + \text{Pick}(R).$$



8. Unión de dos polígonos reticulares con un lado común.



9. Descomposición de un polígono en triángulos y etapas de la demostración del teorema de Pick. Se procede por reducción de los casos complejos a casos más sencillos. (a) *Si el teorema es verdadero para triángulos reticulares, lo es también para todo polígono reticular.* (b) *Si es verdadero para los triángulos rectángulos, también lo es para todo triángulo.* (c) *Si es verdadero para los rectángulos, lo es para los triángulos rectángulos.* (d) *Si es verdadero para los cuadrados 1 × 1, lo es para los rectángulos.* (e) *¡Es preciso comprobarlo!*

"¡Barney, mete enseguida 213,5 cabras en el huerto! ¡No pierdas un momento!

–Algernon, cómo hago para meter media cabra en el huerto?

–Coges el cuchillo grande que está...

–Algernon, le sugiero que meta un cabritillo. Tengo la impresión de que una cabra cortada por la mitad no va a comer mucha hierba. Ni un pepino, como usted dice.

–Claro, claro. Es usted un poco zumbón, ¿verdad Jake?"

Algernon iba diciendo que sí con la cabeza. Se inclinó para quitarse algo de los zapatos y se alejó dando pisotones hacia el sitio donde se habían dispuesto en cuadro 8 losetas de cemento [*véase la figura 11*] con el fin de aislar ese rincón del barro del patio y de otras materias insalubres, además de poderse secar los pies.

"Esto es interesante, se dijo. Otro polígono reticular. ¿Por qué no rendir al viejo Pick un último homenaje? Veamos... Se tiene $B = 16$ y $C = 0$, por lo tanto, el área tiene que ser $B/2 + C - 1 = 8 + 0 - 1 = 7$. ¡Por una cabra loca, eso es falso! ¡El área es 8! ¡Jacob, tenemos aquí un problemita!"

¿Qué es lo que ya no funciona?, ¿Por qué? ¿Qué hipótesis se ha omitido en nuestra "demostración" simplificada de la fórmula?, ¿cómo modificarla para aplicarla también a este caso?

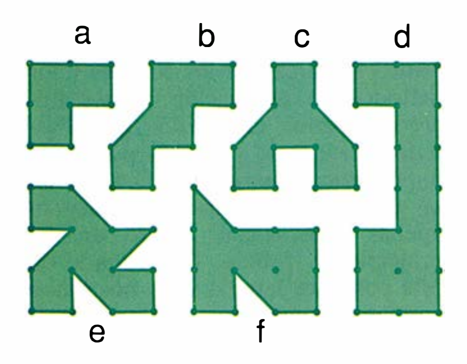
Soluciones

La superficie del objeto en forma de *M* de la figura 6*c* es de 12 unidades, desde luego. Las dos ramas verticales contienen cada una cuatro cuadrados, y si el diente triangular superior se llena deslizando hacia arriba el triángulo inferior correspondiente, se obtienen cuatro cuadrados suplementarios.

Con las formas de la figura 10 podemos preparar la tabla siguiente:

FORMA	*B*	*C*	*B*/2 + *C* -1	*A*
a	8	0	3	3
b	11	0	4,5	4,5
c	12	0	5	5
d	18	1	9	9
e	14	0	6	6
f	12	1	6	6

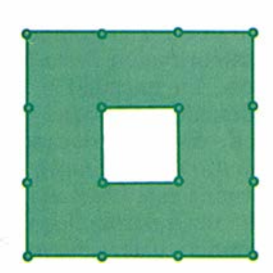
La cuestión de una variante tridimensional del teorema de Pick fue estudiada en 1957 por John Reeve. Observó para empezar que sería imposible la existencia de una fórmula que



10. Verifíquese el teorema de Pick para estos polígonos reticulares.

expresase el volumen de un poliedro reticular en función únicamente de sus puntos interiores y de sus puntos frontera, pues, por ejemplo, el tetraedro de vértices (0,0,0), (1,0,0,), (0,1,0), (1,1,x) tiene exactamente cuatro puntos frontera y cero puntos interiores, mientras que su volumen varía con x. Reeve demostró entonces que introduciendo una segunda red de nodos, compuesta en el caso más sencillo por puntos cuyas coordenadas sean múltiplos de 1/2, es posible encontrar una fórmula válida para todo polígono reticular convexo. Dicha fórmula es demasiado compleja para presentarse aquí; el lector interesado podrá consultar el texto original.

La dificultad de la figura 11 procede del hueco central. La demostración del teorema de Pick supone que, cuando P se corta a lo largo de un único segmento común, se escinde en dos partes Q y R (conjunto simplemente conexo). Para modificar la fórmula es necesario añadir a $B/2 + C - 1$ el número de huecos (para ver que es así, observemos que el número de puntos "rojos" de la figura 8 ya no es 2, sino $2 + 2h$, siendo h el número de huecos; se repite después el razonamiento hecho anteriormente). Esta modificación, estudiada en el trabajo de J. Reeve, constituye uno de los puntos de partida de su generalización a tres dimensiones. J. Reeve enuncia también conjeturas relativas a dimensiones superiores.



11. ¿Qué es lo que no funciona en este caso?

Libros

Koch, mecánica cuántica, sistema nervioso, botánica en imágenes y química biológica

María José Báguena, Pedro Pascual, Luis Alonso y Marià Alemany

ROBERT KOCH. A LIFE IN MEDICINE AND BACTERIOLOGY, por Thomas D. Brock. Science Tech. Publishers; Madison, 1988.

Esta obra, publicada entre dos fechas clave en la historia de la tuberculosis, 1982, centenario del descubrimiento del bacilo tuberculoso y 1990, en que se cumplen cien años de la primera aplicación de la tuberculina, llena un gran vacío en el campo de las biografías de Robert Koch en lengua inglesa.

Su autor, Thomas D. Brock, microbiólogo y profesor de ciencias naturales en la Universidad de Wisconsin en Madison, demostró ya su interés por la historia de la microbiología con la publicación de su obra *Milestones in Microbiology*. El estudio biográfico que ahora presenta está basado en publicaciones autobiográficas del propio Koch y en la correspondencia personal del microbiólogo alemán recogida en las biografías realizadas por Bruno Heymann en 1932 y Bernhard Möllers en 1951, sin duda dos de los mejores estudios sobre su vida y obra.

Brock no oculta su fascinación por el biografiado, al que presenta como un médico rural que, apoyado tan sólo en su propio esfuerzo, logra alcanzar el premio Nobel. Este enfoque no resta objetividad a la obra que, con gran minuciosidad, sigue paso a paso la trayectoria vital de Koch.

La etapa de su vida previa al ejercicio de la medicina es resumida en los dos primeros capítulos. Desde muy temprana edad destacó su afición a la fotografía. La experiencia adquirida en este campo le resultó de gran utilidad cuando posteriormente introdujo por vez primera fotomicrografías para ilustrar sus trabajos bacteriológicos.

En 1873 comenzó su investigación en microbiología. Lo hizo desde el terreno de la salud pública al intentar resolver el problema del carbunco, enfermedad que diezmaba el ganado de la región y que a veces se transmitía al hombre. Koch consiguió esclarecer el complejo mecanismo de contagio desde el animal carbuncoso al hombre. Antes de publicar sus resultados, quiso que Ferdinand Cohn, director del Instituto de Fisiología Vegetal y autor de diversas obras microbiológicas, revisara su trabajo. Empezó con ello una larga y fructífera relación entre ambos, al tiempo que el nombre de Koch salió del anonimato.

En 1880, Koch se puso a la cabeza de un laboratorio de investigación bacteriológica. El autor aprovecha esta parte de la obra para hacer una valoración de lo que considera la mayor contribución de Koch al desarrollo de la bacteriología, la introducción de la técnica de cultivos puros realizados en medios sólidos y semisólidos, hoy conocida como cultivo en lámina de Koch. Se considera, asimismo, su contribución al desarrollo de técnicas de esterilización y desinfección, temas que centraron su atención como responsable de salud pública del gobierno alemán.

El nombre de Koch aparece asociado al bacilo tuberculoso desde 1882, año en que, tras desarrollar los métodos de cultivo y tinción apropiados, publicó su descubrimiento del agente microscópico responsable de la tuberculosis. De inmediato comenzó su búsqueda de una vacuna antituberculosa, tema que se convirtió en una meta obsesiva para él al fracasar con la tuberculina, un extracto de glicerina de un cultivo puro de bacilos tuberculosos. La tuberculina, no obstante, ha quedado como método diagnóstico, mientras que la vacuna hubo de esperar a Calmette y Guérin, que desarrollaron su famosa vacuna conocida como BCG en 1921.

El tema del cólera enfrentó en su época a las dos figuras de la microbiología mundial, Koch y Pasteur. El microbiólogo alemán logró aislar el vibrión colérico en 1884 en suelo francés, tras los esfuerzos inútiles de Pasteur y sus colaboradores, primero en Egipto y posteriormente en Marsella y Tolon. El enfrentamiento entre ambos tenía sus raíces en la investigación del carbunco, llevada a cabo con métodos muy diferentes por las escuelas francesa y alemana. Koch siempre criticó la pureza de los cultivos y los métodos de atenuación de los microorganismos empleados por Pasteur y éste, que ya había publicado importantes trabajos en el campo de la microbiología cuando el alemán apenas comenzaba, ignoró en un principio su trabajo. En el fondo de esta polémica latía la vieja hostilidad germano-francesa que siempre presidió sus discrepancias.

El triunfo de Koch al poner de manifiesto el origen microbiano de la tuberculosis y el cólera marcó indudablemente el comienzo de la institucionalización de la bacteriología. En 1885 se estableció un Instituto de Higiene en la Universidad de Berlín y Koch fue nombrado profesor de higiene adscrito a dicho instituto, que contaba con un laboratorio de bacteriología. Por él pasaron figuras de la talla de Loeffler, Gaffky, Fraenkel, Pfeiffer, Kirchner, todos ellos discípulos de Koch y núcleo de la escuela alemana de microbiología.

Deseoso de abandonar la higiene y dedicarse a la terapéutica, Koch dejó el Instituto de Higiene y pasó al Instituto de Enfermedades Infecciosas, de nueva creación. En su seno se llevaron a cabo descubrimientos de gran trascendencia, como la antitoxina tetánica, por Behring y Kitasato, que abrió paso a la inmunología humoral y la antitoxina diftérica, desarrollada por Behring.

La biografía que nos ocupa hace especial hincapié en los viajes que Koch realizó a Africa y sus investigaciones sobre medicina tropical. Se dijo que abandonaba Alemania para huir de las críticas sobre su trabajo con la tuberculina y también sobre su vida privada, al haberse divorciado y vuelto a casar con una mujer treinta años más joven. No obstante, fue un período muy productivo, realizando importantes trabajos sobre el paludismo, la enfermedad del sueño y diversas enfermedades víricas veterinarias.

En 1905 recibió el premio Nobel de medicina. Aún se enfrentó posteriormente al problema de la tuberculosis y de nuevo de modo polémico al defender que la tuberculosis bovina no se podía transmitir al hombre, por lo que la pasteurización de la leche era innecesaria. La unicidad o dualidad de la tuberculosis humana y bovina fue tema de discusión durante años.

Koch murió el 27 de mayo de 1910. Brock termina esta biografía con una valoración del microbiólogo alemán como científico, bacteriólogo, médico y hombre. Resalta su faceta de investigador experimental por excelencia, con un gran dominio de la técnica microscópica; estas dotes no impidieron

sus dos errores más importantes, la consideración de la tuberculina como un arma terapéutica eficaz y la no contagiosidad de la tuberculosis bovina para el hombre. Como bacteriólogo, se subraya su orientación hacia la salud pública y la importancia de sus métodos de aislamiento y de cultivos puros de microorganismos. Metodológicamente, la formulación de sus "postulados" como fases en la identificación de un microorganismo como agente causal de una enfermedad infecciosa sentó las bases de la microbiología médica.

La obra termina con una cronología de la vida de Robert Koch, una lista de sus publicaciones, una relación de sus biografías más relevantes y un abundante capítulo de notas que no se limitan a ser, como tantas veces, una muestra de la erudición del autor, sino que aportan datos que ayudan a una mejor comprensión del texto. Las ilustraciones son muy numerosas y bien escogidas, algo poco habitual en una biografía científica, logrando una buena ambientación de cada uno de los capítulos.

Se trata en suma de un libro claro en su exposición y preciso en su contenido. Constituirá, sin duda, un instrumento valioso para quien desee acercarse a la vida y obra del gran microbiólogo alemán. (M. J. B.)

QUANTUM MECHANICS. AN INTRODUCTION, por W. Greiner. Springer; Heidelberg, 1989. **QUANTUM MECHANICS. SYMMETRIES**, por W. Greiner y B. Müller. Springer; Heidelberg, 1989.

Más de una generación de estudiantes de física de los países de habla alemana ha entendido y apreciado el poder y la belleza de la física teórica moderna usando como guía los libros de texto de W. Greiner. Aparece ahora un nuevo conjunto de cinco libros de Greiner y sus colaboradores orientado, principalmente, hacia los estudiantes de teoría cuántica de campos. Los tres volúmenes restantes de la serie, que aún no han aparecido en el mercado, son: *Quantum Mechanics. Relativistic Wave Equations*, *Quantum Electrodynamics* y *Gauge Theory of Weak Interactions*.

El primero de los libros de esta nueva serie es una introducción elemental a la mecánica cuántica, caracterizada por una presentación de tipo inductivo: a partir de los experimentos cruciales, debidamente idealizados, las ideas básicas de la disciplina son introducidas de forma paulatina. La organización de los diecisiete capítulos del libro es parecida: la discusión de las ideas fundamentales está entremezclada con ejercicios resueltos, con todo detalle, que aclaran puntos esenciales de la teoría o que son aplicaciones más o menos sofisticadas de la misma. En general, los capítulos terminan con unas breves notas biográficas de los físicos más destacados que desempeñaron un papel importante en el desarrollo de las ideas expuestas. Siempre los pasos intermedios matemáticos son realizados con todo detalle, lo cual, si bien es muy útil para los alumnos, limita extraordinariamente el conjunto de temas que pueden ser tratados.

En su conjunto, esta obra no aporta grandes ventajas sobre muchos de los libros elementales ya existentes. Unicamente el último capítulo, sobre los problemas conceptuales y filosóficos de la mecánica cuántica, es nuevo en esos manuales. Si bien el autor ya reconoce, y parece lógico, que en un libro de este tipo no se

debe pretender presentar todo el campo, resulta un tanto sorprendente que no se hable casi del problema de la colisión de partículas.

La presentación del volumen sobre simetrías, con sus quince capítulos, es parecida al anterior: parte básica, ejercicios y notas biográficas. Es un tanto sorprendente que en un libro sobre simetrías no aparezca ni anunciado ni demostrado el famoso teorema de Wigner. El libro se centra casi exclusivamente en las simetrías continuas y trata menos de lo deseable de las discretas, a las que dedica un total de sólo ocho páginas. El libro está pensado para estudiantes de partículas fundamentales, como se deduce de los títulos y contenidos de varios capítulos: el grupo de isospín, la hipercarga, la simetría SU (3), quarks y SU (3), encanto y SU (4). Sin grandes discusiones matemáticas se logran dar las ideas necesarias para cualquier físico que trabaje en partículas fundamentales. Desde este punto de vista, creo que el libro puede ser de gran utilidad. (P. P.)

NEUROANATOMY. TEXT AND ATLAS, por John H. Martin. Elsevier; Nueva York, 1989. **A HISTORY OF NEUROPHYSIOLOGY IN THE 19th CENTURY**, por Mary A. Brazier. Raven Press; Nueva York, 1989.

A estos dos libros les une, por común denominador, su nítida exposición didáctica. Están escritos para ser vistos, leídos, estudiados y consultados. Vistos porque, obvio en el atlas, la historia ofrece un álbum selecto de instrumentos y diagramas. Leídos porque su redacción diáfana incita a recrearse en su exposición. En cuanto manuales universitarios, su destino señala las aulas y la mesa de estudio del profesor y del alumno: son materia curricular en muchos centros. Por último, la elección de cortes en el primer caso y la abundante bibliografía en el segundo los convierten en obra de referencia frecuente.

¿En qué se distingue la *Neuroanatomy* de Martin de la legión existente? En el equilibrio. Las viejas, y maravillosas, topografías que elevaron el arte del grabado a las cimas de la perfección acostumbraban separar el texto del atlas propiamente dicho. Se le pedía al alumno un duro ejercicio de memoria visual, que decaía al día siguiente del examen. Hijos de las anatomías topográficas fueron los atlas manejables en los que comenzaban a predominar las fotografías sobre los dibujos, tras una esquemática presentación textual de las regiones a distinguir. Atlas que había que completar con "anatomías" ayunas de ilustración o con la mínima para cumplir el expediente. En los últimos quince años la neurología, transformada por expansión tridimensional en "neurociencias", ha conocido un espectacular desarrollo que se manifiesta en copiosa bibliografía, o literatura que dicen los bárbaros. Los primeros manuales de este renacimiento han pretendido recoger los cambios y avances operados y han pecado quizá de pesadez, obscuridad y complicación.

Martin ha tomado el buen camino de la sobriedad. (Pero no se engañe el lector. El libro tiene casi medio millar de páginas, con más de mil figuras.) Sobriedad y rigor. Y actualidad, evidentemente, que se deja sentir sobre todo en los aspectos funcionales e imbricación de los distintos sistemas. Al final de cada capítulo compendia la exposición en un guión esquemático que cumple una doble misión: resumir lo expuesto y, para el discente, servir de punto de comienzo de una nueva lectura y estudio del capítulo. Pensando en los alumnos y en los médicos en ejercicio, la *Neuroanatomy* se articula en tres partes: conceptos fundamentales de la organización del sistema nervioso central, sistemas neurales funcionales y apéndices. Las tres se hallan concatenadas, de suerte que el estudiante proceda de la sencillez de la estructura celular hasta la interpretación de los cortes. Sirve de puente, entre la estructura y la función, el capítulo cuarto: sobre la vascularización del sistema nervioso. Se trata, en definitiva, de una obra sobre los fundamentos y el conocimiento adquirido.

Es reconfortante abrir un manual extranjero y encontrarse con que los dos conceptos básicos llevan sello español. Los últimos componentes del sistema nervioso son las neuronas y la glía. A Cajal le debemos el desentrañamiento funcional de las primeras. Respecto a las células de la glía resume George Somjen, en un vademécum reciente para iniciados: "The classification generally considered valid today (1987) was proposed by del Rio Hortega. It is by his system that we call today the three main types of glia *astrocytes, oligocytes*, and *microcytes* (or by their synonyms, *astroglia, oligodendroglia*, and *microglia*)". Digamos a modo de inciso y por mor de claridad escolar, que conviene hablar, como lo hace Martin, de una doble partición de la glía: la microglía, con función carroñera o fagocítica de las células dañadas, y la macroglía, que, a tenor de su triple misión, abarcaría oligodendrocitos, astrocitos y células ependídimas.

No menor es el reconocimiento, y el afecto, que Mary A. Brazier guarda por Cajal. "In the last year of his life, he lectured to students at London University, leaving an indelible memory on at least one of the student audience." (144). Es la única emoción que no se reprime en *A History of Neurophysiology in the 19th Century*.

Brazier, experta en fisiología del sistema nervioso y, sobre todo, en su actividad eléctrica, se ha convertido en maestra develadora de la evolución temporal de las teorías neurofisiológicas en los últimos siglos. Aquí ha optado por ofrecernos lo que, tomando la expresión del lenguaje del cine, llamaríamos "historia de autor". Prescinde de si es o no moda, de si el método seguido aquí es o no el ortodoxo en la academia; para ella las ideas son de sus autores y, cuando a uno le llega el turno, nos "cuenta su vida". Tiene, no tema el lector, la rara habilidad de ligar esos detalles personales con el estado de la idea en que la ha dejado en el autor precedente.

El concepto fundamental es el de la naturaleza eléctrica de los impulsos nerviosos, comenzados a analizar en los movimientos musculares de ranas y torpedos. En el siglo XIX, la cuestión no era baladí; supuso, nada menos, encarrilar la investigación del tejido nervioso asociada a los principios de la física dominante. La figura de relieve que encarnaba la nueva mentalidad fisicista, Emil Heinrich Du-Bois Reymond, y que sería quien mayor influjo ejercería en dicha centuria, había sido alumno de un eximio representante de la corriente vitalista, Johannes Müller. La autora compagina la descripción de los experimentos, la creación de los instrumentos necesarios y el texto de los resultados, traducido al inglés, en un relato diáfano, fácilmente comprensible para el profano, sin mengua de perspicacia en la interpretación. (Para hacerse una idea más ajustada de la biología del XIX, que el simplismo reduce a la cuestión darwinista, me permito sugerirle al lector, con esta obra, la de Timothy Lenoir *The Strategy of Life*, en la edición enmendada de 1989.)

Du-Bois Reymond, hemos dicho, constituía la figura clave. Los precedentes arrancan de la escuela italiana de Galvani-Volta; las consecuencias llegan hasta la neurofisiología rusa. En medio, la poderosa ciencia alemana, algo la francesa e inglesa. Uno por uno, salvo Cajal y Golgi que hacen bis, van aportando su grano, que Brazier ha espigado de entre la correspondencia y los escritos o de su repetición de los experimentos.

El galvanismo o electricidad animal no fue desconocido en España. Carlos Risueño le dedica varias entradas en su *Diccionario de veterinaria*. Se

tradujo incluso algún trabajo, sobre todo de autores secundarios, Robin, por ejemplo, sobre electricidad de las rayas. Pero no tuvimos zoólogos o médicos capaces de formar escuela, si exceptuamos los fervores por la electroterapia de unos cuantos (Vázquez y Morales, Navarro y Abel de Veas, etcétera) y los escarceos, más rigurosos en sus limitaciones, de Salvá y Campillo. (L. A.)

THE ART OF BOTANICAL ILLUSTRATION. THE CLASSIC ILLUSTRATORS AND THEIR ACHIEVEMENTS FROM 1550 TO 1900, por Lys de Bray. Christopher Helm; Kent, 1989. **AN INTERPRETATION OF VAN RHEEDE'S HORTUS MALABARICUS**, por Dan H. Nicolson, C. R. Suresh y K. S. Manilal. Koeltz Scientific Books; Königstein, 1988.

Decía Joseph Pitton de Tournefort, puntal de la botánica entre Cesalpino y Linneo, que lo que no se puede explicar la ilustración lo aclara. Lo afirmaba porque, feliz él, contaba con el pincel diestro de Claude Ambriet para sus *Elementos de Botánica*. No importa menos tener algo que explicar, y difícilmente hubiera avanzado la fitología sin el *Hortus malabaricus* de Hendrik Adrian van Rheede tot Drakenstein, al que debe muchísimo nuestro primer Cavanilles y el *Species plantarum* linneano.

The art of botanical illustration, a pesar del subtítulo, no pretende contarnos la historia del dibujo al estilo de Agnes Arber sobre los herbarios renacentistas, con un estudio pormenorizado del contenido de las obras de interés. Mucho menos se asimila a las monografías sobre distintos códices miniados de tema floral o los manuscritos de la *Materia medica* de Dioscórides, Pseudo-Apuleyo y otros, que gozan de una acreditada tradición historiográfica desde las postrimerías del siglo pasado. Por resumirlo gráficamente, en estos últimos estudios priman las notas y la letra pequeña; en el volumen de Bray, las láminas.

¿Significa ello que Lys de Bray ha escrito una obra menor? La primera impresión halla razones para suponerlo; basta leer el índice, incluso para sorprenderse: incunables e iconografía (1500 a.C.-1600 d.C.), escuelas holandesa y flamenca (1550-1850), Linneo y otros artistas del siglo XVIII, del Pre-renacimiento a la Post-revolución (1450-1850), Georg Dionysius Ehret (1708-1770), Redouté, Josephine y Malmaison (1759-1840), Kew, corazón del mundo botánico (1760-1900) y pintura botánica moderna (desde 1900 hasta hoy).

La lectura detenida del volumen se encarga de diluir esa prevención inicial e introducirnos en la voluntad de la autora, que no parece ser otra que mostrarnos la belleza de ciertas creaciones que tuvieron, además, indudable incidencia en el progreso de la botánica. Las secuencias históricas son mero pretexto. Ensanchan, eso sí, el conocimiento que teníamos, por ejemplo, de Christoph Jakob Trew y el papel catalizador del jardín de Nuremberg en pleno siglo XVIII.

Pronto se desvanece también el juicio apresurado de considerarlo "libro de mesa de té", por su formato y calidad plástica, si contemplamos las figuras con los ojos de sus autores: destinadas a la enseñanza. En el credo que han confesado siempre los botánicos, el primer artículo de fe es la observación directa de la planta viva; si ello no es posible, fiarse en la seca de herbario; si tampoco se tiene a mano, la descripción y el dibujo que se encuentren. Por eso el creciente esfuerzo por perfilar con la mayor exactitud posible los distintos órganos, por escoger el medio más idóneo (papel o cuero), por seguir la técnica que mejor refleje la planta (óleo o acuarela), por buscar el mejor medio de grabado e impresión. La lámina ha de ser el retrato cabal de la planta y recoger, sobre todo, su *habitus*.

Durante muchísimos siglos, el *habitus* de la planta constituyó el criterio discriminador por excelencia. Paradójicamente es un término de difícil definición. Remite a la armonía o proporción entre las partes integrantes. Es el "aire" o "aspecto general" de una planta. Más que cualquier descripción, por minuciosa que fuera, la lámina era la que mejor ofrecía ese sello distintivo y exclusivo. Sirva esto de preámbulo para mirar con buenos ojos el álbum de Bray. Sin disculparle, por supuesto, la grave omisión de los dibujantes españoles o la pintoresca versión anglo-francesa del asunto de Dombey y L'Heritier a propósito de la reclamación hispana de los derechos de las especies recolectadas en las expediciones de Perú y Chile.

Sin ningún tipo de prevención, sino con la esperanza que mueve a sumergirnos en un buen libro hay que abrir *An interpretation of Van Rheede's Hortus malabaricus*, publicado dentro de la colección "Regnum Vegetabile", serie de monografías sobre taxonomía botánica de muy exigentes características. Hendrik Adrian van Rheede (1636-1691), o *Rhedius*, era un militar holandés que simultaneó el uso de las armas con la recolección de las plantas con el mismo propósito de velar por quienes estaban bajo sus órdenes; en efecto, el azaroso viaje de los "simples" desde la metrópoli hasta la India le indujo a buscar sustitutivos en la flora local, no obstante la oposición de los galenos de turno. En la labor de identificación encontró la experta ayuda de un carmelita portugués, un tal fray Matías de San José, un proscrito en el papel como todos los católicos de los dominios holandeses. El principal biógrafo de van Rheede, J. Heniger, ha escrito recientemente (1986) hermosas páginas sobre su rebeldía contra el sectarismo del poder político ante las exigencias del bien común, y lo que con ello ganó la ciencia.

Hortus malabaricus consta de 12 volúmenes con un total de 1534 páginas impresas y 793 ilustraciones para describir 690 especies, repartidas en 675 angiospermas, 2 gimnospermas, 13 pteridófitos y 1 briófito. Cada planta aparece con su nombre en distintos idiomas orientales, en holandés y en portugués; se anotan también sus propiedades terapéuticas y modo de empleo, para lo que se escuchó la opinión de médicos locales que fundaban en una suerte de Dioscórides oriental, hoy desconocido: *Manhaningattnam*.

Hemos avanzado el influjo de van Rheede en Linneo y Cavanilles. No sólo en ellos. Adanson, Burman, Lamarck, Jussieu, de Candolle y Kosteletzky establecieron muchos géneros apoyados en las aportaciones de Rhedius. Botánico de tan poderoso pulso no podía menos que ser objeto de atención, y lo ha sido desde las recensiones que ya recibió en *Journal des Savans, Philosophical Transactions* y *Acta Eruditorum*, que, en el último tercio del XVII, eran el trío de revistas de mayor peso intelectual.

¿Cómo leer hoy un texto clásico, así el *Hortus*? No basta con saber latín –idioma en que están escritas las descripciones–, ni ser ducho en botánica general. Se necesita, además, conocer la flora local y los usos terapéuticos de las plantas por sus habitantes. Esas exigencias se han satisfecho en la preparación de este volumen en el que Manilal es profesor de la Universidad de Calcuta, experto en historia de la materia médica local, Nicolson es autor de una flora del estado de Karnataka (India) y Suresh preparó su tesis doctoral en la Universidad de Calcuta sobre las plantas reseñadas en el *Hortus*. Han evitado la glosa *ad litteram* en aras de una exposición de las familias donde van hallando su incrustación debida las distintas especies de Rhedius. ¿Cuándo haremos algo parecido nosotros con Clusius, por ejemplo? (L. A.)

INTRODUCCIÓN A LA QUÍMICA ORGÁNICA Y BIOLÓGICA, por A. C. Wilbrajam y M. S. Matta. Addison-Wesley Iberoamericana; México, 1989.

Este libro está pensado como ligera introducción a la bioquímica para alumnos con alguna base química; sin embargo, a la superficialidad de los contenidos de química orgánica se une una superficialidad comparable en la parte dedicada a la bioquímica. El ambicioso objetivo que ha llevado a los autores a condensar una gran cantidad de información en poco más de 500 páginas se complementa con múltiples incisos de corta extensión que desarrollan algunos aspectos amenos o de interés. Al final, hay un breve pero explicativo glosario de términos que debe facilitar su empleo por el estudiante.

El texto que nos ocupa ha sido muy trabajado desde el punto de vista didáctico, ya que contiene numerosos ejercicios y problemas al final de cada apartado que permiten establecer el aprovechamiento del alumno paso a paso. El estilo es terso, breve y directo, sin que se pierda espacio en las definiciones o descripciones, pero siempre ajustado desde el punto de vista didáctico. En conjunto, el texto es ameno y fácil de leer por el gran número de breves ampliaciones sobre temas de interés que contiene. Está muy organizado, con abundantes entradas que luego se desarrollan con brevedad, a menudo refiriendo sólo grandes generalidades que carecen de profundidad informativa.

En el libro se hace hincapié en algunos temas que suelen confundir más al alumno, como la estereoisomería, aquí desarrollada en el apartado de los glúcidos. En otras partes, el tratamiento es tal vez excesivamente esquemático y superficial, sobre todo en lo referente al estudio del metabolismo, que se trata con una sobriedad espartana y se despacha en muy pocas páginas.

Algunos puntos están muy bien presentados, de un modo fácilmente comprensible para el público al que va destinado el libro; por ejemplo, el símil de mutaciones sobre tripletes de bases que los autores desarrollan sobre una frase en castellano: UNA VEZ UNA BOA IBA POR UNA VÍA en vez de sobre una secuencia de bases imaginaria; las mutaciones por adición o supresión de una letra dan lugar a fragmentos sin sentido, igual que muchas sustituciones, alguna de las cuales sí tiene sentido (UNA VEZ UNA BOA IRÁ POR UNA VÍA). Claro está, este punto es por igual mérito de los traductores, L. Bascur, J. Medina y R. Zugazagoitia, que de los autores del original inglés. A lo largo de todo el texto se aprecia este especial cuidado por hacer fácilmente comprensible la materia. Este planteamiento viene ayudado por una adecuada realización gráfica: profusa utilización de negritas, cursiva, amplios espacios blancos y la tirada a dos colores, negro y azul, de todas las páginas. El problema surge cuando la calidad de la impresión y del papel no corren parejas con el diseño del texto.

Un capítulo amplio e importante, como el del metabolismo de los lípidos, por ejemplo, en 21 páginas (de ellas unas 9 de texto propiamente dicho) desarrolla todo el metabolismo lipídico, desde las enfermedades por almacenamiento de lípidos complejos hasta la lipolisis estimulada por hormonas, pasando por la beta-oxidación, los cuerpos cetónicos y la aterosclerosis, y aún queda espacio para tratar del efecto del clofibrato en el exceso de deposición de colesterol en los vasos sanguíneos. Se incluye una página de problemas, otra entre introducción y definición de objetivos y una breve lista al final de "palabras clave" y lecturas recomendadas. Dudo que alguien adquiera una idea global mínimamente sólida de qué es el metabolismo lipídico tras leer un capítulo como el citado. Se tocan todos los temas, pero se tratan como de pasada, salvo la beta-oxidación, que se aborda a fondo, correctamente y con un estudio adicional de su energética. En definitiva, el objetivo planteado (y los que se indican en cada capítulo) parece demasiado ambicioso para una producción como la que nos ocupa.

Por lo que respecta a la terminología, adolece de algunos problemas de adaptación (al igual que muchos otros textos, por desgracia), debidos a la no aplicación de las normas de nomenclatura de la IUPAC-IUB. Por ejemplo, se habla de los triacilglicéridos y no de triacilgliceroles, y se hace uso de abreviaturas de tres letras para designar enzimas (LDH por lactato deshidrogenasa, TGC por alanina transaminasa o TGO por aspartato transaminasa). Se echa en falta un adecuado tratamiento de la nomenclatura de compuestos bioquímicos: la clasificación y nomenclatura de las enzimas se despacha con un simple párrafo de generalidades.

En general, se observa cierta antigüedad en el tratamiento de las principales cuestiones de la bioquímica actual, en especial la parte de biología molecular y un escaso tratamiento de todo lo relacionado con la regulación metabólica, particularmente de las hormonas. Esta falta de profundidad sería comprensible en un texto que sólo pretende ser una "Introducción", pero su exposición más extensa de otras hace dudar de la idoneidad de la selección de los temas que han recibido un mínimo desarrollo adicional. Tal vez el intento de abarcar tantos campos y frentes de desarrollo (fármacos, productos naturales, inmunología, biología molecular, metabolismo, nutrición o incluso fisiología) es excesivo, incluso para un texto introductorio. El resultado es un interesante caleidoscopio en que, a lo largo de una sucesión de capítulos notoriamente desorganizada, se va desgranando un rosario de aspectos diversos de la química de los seres vivos, con un enfoque esencialmente químico clásico, mecanicista, en el que la globalidad de los procesos no se contempla y en el que la conexión entre los diversos temas tratados se pierde en una secuencia de capítulos desorganizada. El libro tiene un primer hilo conductor clásicamente orgánico, que se diluye al comenzar a describir las moléculas constitutivas de los seres vivos y que desaparece totalmente al adentrarse en la bioquímica.

La visión que da este libro de la bioquímica corresponde a un enfoque esencialmente estructural y orgánico; la prueba está en el poco espacio e importancia que merecen las vías metabólicas y en el planteamiento que hace, de los escasos procesos que desarrolla, yuxtaponiendo reacciones independientes. Hay una grave falta de esquemas metabólicos globales, que resultan imprescindibles en un texto introductorio para poder dar una impresión general del funcionamiento de los organismos vivos. Tal vez sea éste el problema fundamental del libro, el escaso convencimiento de los autores en esta visión global funcional de los seres vivos. Un texto de introducción a la bioquímica que aborde la fotosíntesis en cuatro breves párrafos y una ecuación del tipo: $CO_2 + H_2O \longrightarrow$ glucosa $+ O_2$, no puede decirse que cumpla su objetivo, ya que este nivel se supera incluso en los textos destinados a alumnos de enseñanza primaria.

A lo largo del texto surgen otros errores o planteamientos ambiguos que poco pueden hacer por mejorar la comprensión de los temas por el alumno. Así se pueden citar, entre otros, la mezcla dentro del apartado de los antibióticos de quimioterápicos como las sulfamidas y de la exclusión de la histidina de la lista de los aminoácidos esenciales.

En definitiva, se trata de un libro interesante, que no se hace pesado, didáctico pero muy escaso de profundidad y actualidad. Como "Introducción" falla, al no superar la exposición superficial, y como texto de química orgánica y bioquímica carece de suficiente actualidad, globalidad y profundidad para ser útil al público destinatario. (M. A.)

Apuntes

El cadmio es un contaminante común de origen industrial que bloquea el desarrollo de las plantas y altera muchos procesos metabólicos. Reduce, también, el contenido clorofílico de las hojas y el número de cloroplastos por unidad de superficie foliar. Impide la fotosíntesis. Tantos males encontraban lenitivo en el manganeso. Se acaba de comprobar que, con molibdeno, se anulan asimismo los efectos del cadmio.

La historia geológica de Iberia evidencia también un proceso de integración en Europa. Desde las postrimerías del Cretácico hasta el Eoceno medio estuvimos anclados en la placa africana, y con ella nos movíamos. Desde el Eoceno medio hasta el Oligoceno tardío gozamos de cierta autonomía, si no de independencia absoluta. Desde el Oligoceno tardío, Iberia ha recorrido la misma suerte que la placa eurasiática, con la frontera meridional puesta en la zona de fractura Azores-Gibraltar.

En el sistema nervioso periférico, la mielina constituye una extensión de la membrana plasmática de las células de Schwann que envuelve estrechamente los axones en varias capas. Tiene por misión facilitar la rápida transmisión de los impulsos nerviosos. Se desconocía cuál era el broche que ligaba con tanta firmeza múltiples capas ceñidoras. De acuerdo con investigaciones recientes podría tratarse de la proteína Po, de propiedades adhesivas homofílicas.

La trampa, la zancadilla y la filibustería no son prácticas exorcizadas de los laboratorios de investigación. Cuenta Gerald R. Fink, creador de un método para introducir genes foráneos en el genoma de la levadura y descubridor en ésta de partículas parecidas a los retrovirus, que esos hallazgos no se hubieran producido sin la generosa cesión que le hizo su colega John Carbon, de la Universidad de California en Santa Bárbara: ''necesitábamos un reactivo que él tenía. Gracias a ello le ganamos la partida en la investigación sobre levaduras. Yo diría que ese comportamiento de mutuo apoyo y camaradería caracteriza en un 90% el trabajo científico.''

Desde hace cincuenta años los ecólogos conocen una sincronía singular entre la eclosión del fitoplancton y la producción de larvas bentónicas, contemporaneidad que asegura el abastecimiento de dichas larvas. Para explicar el fenómeno han apelado a las variables del medio, verbigracia, cambios en la temperatura, salinidad, fotoperiodo y turbulencia, que promoverían la liberación de gametos. Comienza ahora a cobrar cuerpo otra vía de argumentación: la feracidad fitoplanctónica sería la desencadenante de la proliferación animal, hipótesis que se ha comprobado en erizos de mar y mejillones.

Abundan las pruebas de que los insectos vuelan por mecanismos distintos de los aplicados a aeroplanos y helicópteros. Y no sólo en lo relativo al vuelo de crucero, sino también en lo concerniente al movimiento inicial de ascensión. El estudio del comportamiento alar y del flujo de corrientes en las distintas posiciones muestra que no cumplen las leyes por las que se rige la aerodinámica convencional.

Llámase ciclo celular aquel en que se suceden los procesos necesarios para llevar a buen puerto la reproducción de la célula. Los dos episodios principales, comunes a todos los ciclos celulares, son la fase S, en que los cromosomas se replican, y la fase M, cuando los cromosomas replicados se segregan en las dos células hijas. La entrada en la fase M, se cree ahora, viene instada por la activación de una quinasa que exige su propia desfosforilación y la intervención persistente de las ciclinas.

La unión, también de los pequeños, hace la fuerza. Para determinadas investigaciones no se necesitan presupuestos astronómicos, ni lamentarse estérilmente de las diferencias Norte-Sur. El buque oceanográfico *Sagar Kanya*, de la India, navega por las aguas del Caribe para cartografiar los recursos marinos en los que tienen interés 13 países de la zona: isla de la Antigua, Bahamas, Barbados, Belize, Dominica, Grenada, Guyana, Jamaica, San Kitts y Nevis, Santa Lucía, San Vicente y Trinidad y Tobago. Es el primer paso para explotar su propia riqueza, controlar la contaminación y frenar la erosión costera.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



CUANDO LA CIENCIA SE CONVIERTE EN TESTIGO, por Peter J. Neufeld y Neville Colman
En los juzgados, las pruebas forenses merecen escaso aprecio por parte de profesionales legos en asuntos científicos. Pero la justicia se verá mejor servida con una mayor atención a los análisis y resultados que las nuevas técnicas ofrecen.

EL PROBLEMA DE LOS NEUTRINOS SOLARES, por John N. Bahcall
El sol no emite estas esquivas partículas en la cuantía que predicen las teorías. Esa discrepancia cuestiona las hipótesis vigentes sobre la física y procesos solares.

INMUNOLOGIA ANTITUMORAL, por Steven A. Rosenberg
La terapia basada en la transferencia celular es una de las nuevas estrategias desarrolladas para estimular el potencial congénito del sistema inmune ante la propagación cancerosa.

***ARCHAEOPTERYX*, por Peter Wellnhofer**
Mal clasificado a veces, cuando no considerado un fraude, este volador prehistórico sigue constituyendo una rica fuente de información sobre la evolución de las aves.

¿HACIA DONDE VA EL TRANSPORTE?, por Karen Wright
La automoción ha puesto la mirada en la técnica de avanzadilla, en busca de un coche no contaminante, seguro y divertido.

LA FREZA DEL CAPELAN, por William C. Leggett y Kenneth T. Frank
Este pez deposita sus huevos en las playas de Terranova, donde los alevines permanecen una semana. Después, abandonan la tierra y se dirigen al mar en respuesta a señales complejas transmitidas por viento y agua.

NUEVA GENERACION DE PARACAIDAS, por Carl W. Peterson
Los avances en teoría aerodinámica, ciencia de los materiales y análisis por computador han posibilitado el diseño de paracaídas que deceleran su velocidad supersónica hasta el paso manso del caracol en cuestión de segundos.

LEONARDO TORRES QUEVEDO, por Francisco González de Posada
Su tarea pionera en automática, universalmente reconocida, demanda una aproximación a la singular y prolífica creación en múltiples campos de nuestro compatriota.

